

Grado en Ingeniería Mecánica
2016/2017

Trabajo Fin de Grado

SIMULACIÓN BIDIMENSIONAL DEL CORTE DEL ACERO AISI 1050

Nuria Herrero Cuenca

Tutor:

Xavier Soldani

Leganés, septiembre de 2017



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons
Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada

RESUMEN

Este proyecto surge con la finalidad de analizar el comportamiento del acero AISI 1050 en el proceso de conformación por arranque de viruta en corte ortogonal. La importancia del estudio del comportamiento de un material como el acero se debe principalmente a que, por sus características, es uno de los materiales más empleados en la actualidad en el sector industrial.

El modelo numérico empleado se ha obtenido con la herramienta de cálculo ABAQUS/*Explicit*, un modelo Lagrangiano basado en el método de elementos finitos (MEF). Se ha establecido una ley de comportamiento del material (ley de Johnson-Cook), cuya ecuación está implementada en el *software* y tiene en cuenta la termoviscoplasticidad del material a estudiar. Es importante indicar que los resultados que se obtienen de las simulaciones numéricas no son exactos, pero son tan aproximados que se consideran válidos.

Existen ciertas variables que van a ser objeto de estudio: las fuerzas de corte y de avance, la morfología de la viruta y la longitud de contacto. Estas dependen de otros parámetros como la velocidad de corte, el avance y el coeficiente de fricción, por lo que se modificarán estas tres variables para analizar su influencia en los resultados. Con la finalidad de validar el modelo, se comparan los datos experimentales disponibles en la literatura con los resultados de las fuerzas de corte y de avance obtenidas a partir del modelo numérico, en las mismas condiciones de corte que en los ensayos.

A partir de la realización de este proyecto, se ha llegado a conclusiones muy interesantes que permitirán simplificar y disminuir el coste y el tiempo de cálculo en trabajos experimentales y ensayos futuros. Se ha realizado un presupuesto y un análisis del impacto socioeconómico que conlleva la elaboración de este proyecto. Además, se plantean trabajos futuros que puedan surgir a partir de este proyecto y que puedan perfeccionarlo o complementar trabajos de investigación similares realizados previamente.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
CAPÍTULO I.....	8
1. Introducción	8
1.1 Motivación	9
1.2 Objetivos	10
1.3 Metodología	11
1.4 Herramientas empleadas	12
1.5 Estructura de la memoria.....	13
1.6 Marco regulador	14
CAPÍTULO II	15
2. Estado del arte	15
2.1 Los aceros.....	16
2.1.1 Generalidades del acero	16
2.1.2 Clasificación de los aceros	17
2.1.3 AISI 1050	18
2.1.3.1. Propiedades del acero AISI 1050	18
2.1.3.2. Composición del acero AISI 1050	18
2.1.3.3. Características del acero AISI 1050	19
2.1.3.4. Aplicaciones del acero AISI 1050.....	21
2.2 Mecanizado	22
2.2.1 Definición.....	22
2.2.2 Proceso de fabricación	22
2.2.3 Movimientos de arranque de viruta.....	23
2.2.4 Variables del proceso	25
2.2.5 Magnitudes de corte y de virutas producidas	26
2.2.6 Corte ortogonal.....	28
2.2.6.1 Ángulos de las herramientas de corte.....	29
2.2.6.2 Velocidades en el corte ortogonal	30
2.2.6.3 Ángulo de cizallado (ψ).....	31
2.2.6.4 Fuerzas de corte ortogonal	32

2.2.7	Secuencia de la formación.....	34
2.2.8	Tipos de viruta.....	35
2.2.9	Ventajas y desventajas del proceso de arranque de material.....	42
2.2.10	Herramientas para mecanizado	42
2.2.11	El calor en la formación de viruta	44
2.3	Método de elementos finitos	47
CAPÍTULO III.....		50
3.	Estudio experimental.....	50
3.1	Mecanizado en corte ortogonal del acero.....	51
3.2	Fuerzas de corte y de avance experimentales.....	52
CAPÍTULO IV		55
4.	Modelo numérico	55
4.1	Características básicas del modelo numérico.....	56
4.2	Mallado	57
4.3	Ángulos de la herramienta y geometría de corte	59
4.4	Parámetros de corte	59
4.5	Ecuación constitutiva del material de la pieza	61
4.6	Descripción de las simulaciones y estudio de los parámetros	62
CAPÍTULO V		65
5.	Validación y resultados	65
5.1	Validación del modelo numérico	66
5.2	Resultados	68
5.2.1	Estudio de las fuerzas de corte y de avance	68
5.2.1.1	Influencia de la velocidad de corte sobre las fuerzas de corte y de avance.....	74
5.2.1.2	Influencia del avance sobre las fuerzas de corte y de avance.....	75
5.2.1.3	Influencia del coeficiente de fricción sobre las fuerzas de corte y de avance	75
5.2.2	Estudio de la morfología de la viruta	76
5.2.2.1	Influencia de la velocidad de corte en la morfología de la viruta.....	76
5.2.2.2	Influencia del avance y el coeficiente de fricción en la morfología de la viruta	79
5.2.3	Estudio de la longitud de contacto	79
CAPÍTULO VI.....		83
6.	Entorno socioeconómico y presupuesto	83
6.1	Entorno socioeconómico	84
6.2	Presupuesto	85

CAPÍTULO VII	88
7. Conclusiones y trabajos futuros	88
7.1 Conclusiones	89
7.2 Trabajos futuros.....	90
BIBLIOGRAFÍA.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de acero empleados en automóviles (Audi) [3]. -----	9
Figura 2. Diagrama de Gantt-----	12
Figura 3. Ejemplos de aplicaciones de acero al carbono [15], [16].-----	21
Figura 4. Arranque de viruta con filos geoméricamente determinados [19]. -----	22
Figura 5. Arranque de viruta con filo de forma geoméricamente indeterminada [19]. -----	23
Figura 6. Movimiento de: (a) Cepillado; (b) Cilindrado; (c) Fresado; (d) Taladrado [19].-----	24
Figura 7. Velocidad de corte en el: (a) Torneado; (b) Fresado [19]. -----	27
Figura 8. Corte ortogonal y oblicuo, con inclinación i [21].-----	28
Figura 9. Herramienta manual de corte: buril [19].-----	29
Figura 10. Ángulos en el corte ortogonal [19].-----	29
Figura 11. Velocidades en el corte ortogonal (Fuente: [20]).-----	30
Figura 12. Ángulo de cizallamiento (Fuente: [20]).-----	31
Figura 13. Fuerzas en el corte ortogonal (Fuente: [20]). -----	32
Figura 14. Proceso de formación de viruta [20].-----	35
Figura 15. Variación de la forma de la viruta en función de distintos parámetros del proceso [17]. ----	37
Figura 16. Esquema de un proceso de corte bidimensional (corte ortogonal) [22].-----	38
Figura 17. Tipos básicos de viruta y fotomicrográficas correspondientes al corte de metales: (a) viruta continua con zona primaria angosta y recta; (b) zona secundaria de corte en la interfaz entre viruta y herramienta; (c) viruta continua con zona primaria de corte grande; (d) viruta segmentada o escalonada; (e) viruta discontinua [22]. -----	40
Figura 18. (a) Esquema de la acción de un rompevirutas; (b) Rompevirutas prensado o la cara de ataque de una herramienta de corte; (c) Surcos en las herramientas de corte, que funcionan como rompevirutas [22].-----	41
Figura 19. Zonas de generación de calor en el corte [23]. -----	45
Figura 20. Variación de la temperatura en función de: a) Velocidad de corte; b) Avance [17].-----	46

Figura 21. Distribución típica de la energía total de corte entre herramienta, la pieza de trabajo y la viruta en función de la velocidad de corte [22].-----	47
Figura 22. Esquema seguido con el programa ABAQUS/Explicit. -----	49
Figura 23. Herramienta de plaquita empleada en los ensayos [27].-----	52
Figura 24. Fuerzas experimentales de corte y avance para un valor de avance 0.12 mm. -----	53
Figura 25. Fuerzas experimentales de corte y avance para un valor de avance 0.16 mm. -----	54
Figura 26. Modelo numérico empleado. -----	56
Figura 27. Mallado del modelo numérico. -----	58
Figura 28. Ángulos de la herramienta y geometría de corte. -----	59
Figura 29. Esquema de las simulaciones realizadas. -----	64
Figura 30. Gráfica de las fuerzas obtenidas del programa y experimentales para un avance de 0.12 mm. -----	67
Figura 31. Gráfica de las fuerzas obtenidas del programa y experimentales para un avance de 0.16 mm. -----	67
Figura 32. Gráficas fuerza-tiempo proporcionadas por el programa ($V_c=75$ m/min; $a=0.12$ mm; $\mu=0.5$). -----	69
Figura 33. Tendencia de las gráficas fuerza-tiempo.-----	70
Figura 34. Gráficas fuerza-tiempo para cada velocidad de corte ($a=0.12$ mm y $\mu=0.5$).-----	71
Figura 35. Gráfica fuerza-tiempo para una velocidad de corte de 75 m/min y: (a) un avance de 0.16 mm y $\mu=0.5$; (b) un avance de 0.12 mm y $\mu=f(V_c)$.-----	72
Figura 36. Gráfica de las fuerzas de corte obtenidas de las simulaciones frente a la velocidad de corte para diferentes condiciones de avance y fricción. -----	73
Figura 37. Gráfica de las fuerzas de corte obtenidas de las simulaciones frente a la velocidad de avance para diferentes condiciones de avance y fricción. -----	73
Figura 38. Gráfica de coeficiente de fricción-velocidad de corte para diferentes avances. -----	75
Figura 39. Morfología de la viruta para diferentes velocidades de corte ($a=0.12$ mm y $\mu=0.5$). -----	77
Figura 40. Morfología de la viruta para diferentes velocidades de corte:(a) $a=0.12$ mm y $\mu=f(V_c)$; (b) $a=0.16$ mm y $\mu=0.5$;(c) $a=0.16$ mm y $\mu=f(V_c)$. -----	78
Figura 41. Longitud de contacto entre viruta-herramienta. -----	79
Figura 42. Gráfica longitud de contacto-tiempo de corte ($V_c=75$ m/min; $a=0.12$ mm; $\mu=0.5$). -----	80
Figura 43. Gráfica longitud de contacto-velocidad de corte para diferentes avances. -----	81
Figura 44. Gráfica longitud de contacto-velocidad de corte para diferentes coeficientes de fricción. ---	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Actividades realizadas en el presente proyecto.-----	12
Tabla 2. Propiedades del acero AISI 1050 [8].-----	18
Tabla 3. Composición química del acero AISI 1050 [9] .-----	19
Tabla 4. Clasificación de los aceros según la norma AISI [11].-----	20
Tabla 5. Aleantes principales del acero según el primer dígito (Fuente: [11]).-----	20
Tabla 6. Factores que influyen sobre el proceso de corte (Fuente:[2]).-----	26
Tabla 7. Resultado de las fuerzas de corte y avance experimentales (Fuente: [27]).-----	52
Tabla 8. Parámetros de Johnson-Cook del acero AISI 1050 (Fuente: [27]).-----	62
Tabla 9. Propiedades de la pieza y la herramienta de corte.-----	62
Tabla 10. Coeficientes de fricción experimental en función de la velocidad de corte (Fuente: [27]).----	63
Tabla 11. Datos de las fuerzas de corte y avance para un avance de 0.12 mm.-----	66
Tabla 12. Datos de las fuerzas de corte y avance para un avance de 0.16 mm.-----	66
Tabla 13. Fuerzas de corte obtenidas de las simulaciones numéricas para diferentes condiciones de corte.-----	72
Tabla 14. Fuerzas de avance obtenidas de las simulaciones numéricas para diferentes condiciones de corte.-----	72
Tabla 15. Datos de la longitud de contacto a lo largo de la distancia mecanizada.-----	80
Tabla 16. Valores de la longitud de contacto para diferentes condiciones de avance y fricción.-----	81

CAPÍTULO I

1. Introducción

En este capítulo, a modo de introducción, se presentan las razones por las que se realiza este proyecto, los principales objetivos que se pretenden obtener a partir de su elaboración, así como las fases que se han ido desarrollando en el trabajo. Además, se describe la herramienta de cálculo empleada para realizar las simulaciones numéricas y la estructura que se ha seguido en la presente memoria. El último apartado de este capítulo introductorio corresponde al marco regulador.

1.1 Motivación

Hoy en día, el acero es uno de los motores principales para el desarrollo de la humanidad y ha tenido un gran impacto en nuestra sociedad. De hecho, la cantidad de producción de acero indica la prosperidad del país. Esta dependencia del hombre por este material se debe principalmente a su abundancia natural, las excelentes propiedades que presenta, así como al avance de las nuevas tecnologías en procesos de obtención y procesado [\[1\]](#).

Se trata de un material muy presente en la vida cotidiana y tiene numerosas aplicaciones debido a sus propiedades, su versatilidad y adaptabilidad. Se puede encontrar en las herramientas y utensilios, en los electrodomésticos y maquinaria, en equipos mecánicos, así como en el sector de la construcción, en las estructuras de las viviendas y edificios modernos. También se emplea para la fabricación de maquinaria agrícola y de medios de transporte de mercancías, para la construcción de infraestructuras viarias, barcos y material rodante y en la industria de armamento. En el uso cotidiano, se encuentra de manera frecuente en varios envases destacando, en el sector alimentario, los aceros inoxidable.

Otra de sus aplicaciones es en la fabricación de automóviles, siendo de acero la mayoría de sus componentes: el chasis, la carrocería, piezas de la dirección, de la transmisión y del motor [\[2\]](#).

A modo de ejemplo, se muestra un automóvil convencional (*figura 1*), en el que se puede apreciar todos los tipos de acero que se presentan en la estructura de su carrocería.

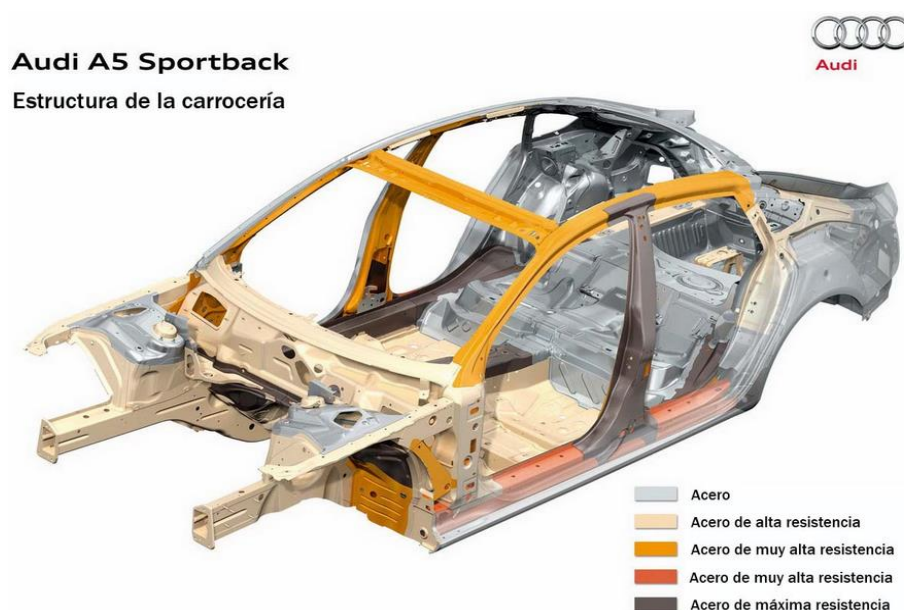


Figura 1. Tipos de acero empleados en automóviles (Audi) [\[3\]](#).

Dentro de los aceros, se encuentran diferentes tipos atendiendo a la clasificación que se realice. Como se mencionará posteriormente, el acero que se estudia es un acero al carbono, con un porcentaje medio de este elemento. Históricamente, el 90% de la cantidad mundial que se produce corresponde a este tipo de aceros, mientras que el 10% restante es de aceros aleados. Sin embargo, con el objetivo de aligerar peso en las estructuras y en los automóviles, reducir precios, y reforzar la seguridad ante impactos, existe una tendencia al aumento de la proporción de aceros aleados [\[4\]](#).

Aunque el acero presenta algunas limitaciones como son la corrosión y su debilitamiento a bajas temperaturas, este cuenta con numerosas ventajas respecto a otros materiales debido a sus propiedades. Por otro lado, el mecanizado es un proceso de arranque de viruta muy utilizado que induce deformaciones, velocidades de deformación y temperaturas altas, por lo que el estudio del comportamiento de este material durante este proceso es muy interesante para la industria. En particular, este proyecto se centra en el torneado, que es una de la familia de procesos más empleada dentro del mecanizado.

Debido a todo ello, y como se comentará en el siguiente apartado, el análisis del comportamiento del acero AISI 1050 en el proceso de corte ortogonal mediante el empleo del *software* de elementos finitos ABAQUS/ *Explicit*, atendiendo a la longitud de contacto, la morfología de la viruta y las fuerzas de avance y de corte, es el principal objeto del presente proyecto.

1.2 Objetivos

Con la realización de este proyecto se pretende conseguir los siguientes objetivos:

1. Analizar el comportamiento que presenta el acero AISI 1050 en los procesos de mecanizado en corte ortogonal.
2. Validar el modelo que se ha empleado para realizar las simulaciones numéricas sobre el acero AISI 1050 en las operaciones de corte ortogonal, mediante el programa de ABAQUS/*Explicit*, basado en el método de elementos finitos. Para ello, los resultados de las fuerzas obtenidos en las simulaciones se comparan con los datos experimentales de la literatura.
3. Realizar un estudio sobre cómo influye la modificación de algunos parámetros (velocidad de corte, avance y coeficiente de fricción) en los resultados obtenidos de las

simulaciones numéricas (las fuerzas de corte y de avance, la morfología de la viruta y la longitud de contacto).

4. Conseguir un ahorro de tiempo y costes de cara a realizar proyectos futuros, a partir de la validación del modelo numérico.

1.3 Metodología

El desarrollo del proyecto consiste en la realización de simulaciones numéricas con la herramienta de elementos finitos ABAQUS/*Explicit*. Para ello, se parte de un archivo .CAE, y se definen las propiedades mecánicas y térmicas del material a estudiar en el programa y se modifica la geometría de la herramienta, variando el ángulo de desprendimiento de 0° a 5°. De la misma manera, se introducen los parámetros de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook que se mantienen invariables durante todas las simulaciones. Sin embargo, como uno de los objetivos es estudiar cómo influyen los parámetros de corte en el comportamiento del material, estos se van modificando, tomando valores diferentes de avance y de velocidad de corte y empleando un coeficiente de fricción variable. Así, se crean diferentes archivos .INP, uno para cada simulación, que se lanzarán en el programa para obtener los distintos resultados que posteriormente se analizarán.

Tras la realización de todas las simulaciones numéricas, se analiza cómo influye cada valor de velocidad de corte, avance y coeficiente de fricción en las fuerzas de corte y de avance, así como en la morfología de la viruta y la longitud de contacto. Durante el estudio de las primeras simulaciones, el coeficiente de fricción μ se mantiene constante.

Con la finalidad de comparar los resultados de las simulaciones con los que se han obtenido experimentalmente, es preciso definir en el programa los mismos valores de los parámetros que se emplearon en los ensayos. Es por ello que, para cada valor de la velocidad de corte y del avance, se emplea un valor diferente del coeficiente de fricción, que es el mismo que se determina experimentalmente.

Así, se observa la relación que existe entre los resultados obtenidos (de las fuerzas de corte y de avance, la longitud de contacto y la morfología de la viruta), y las variables independientes que se han ido modificando, como la velocidad de corte, el avance y el coeficiente de fricción.

La elaboración del presente proyecto conlleva una serie de tareas realizadas a lo largo de 7 meses (febrero-2017/septiembre-2017) que se recogen en la *tabla 1* y se representan en un diagrama de Gantt (*figura2*).

Proyecto	Descripción de actividad	Fecha inicio prevista	Días trabajados	Fecha final prevista
Proyecto 1	Instalación y comprobación del programa	2-feb.-17	14	16-feb.-17
Proyecto 2	Modificación del modelo numérico	17-feb.-17	7	23-feb.-17
Proyecto 3	Creación y modificación de archivos .INP	24-feb.-17	7	3-mar.-17
Proyecto 4	Lanzamiento de simulaciones	28-feb.-17	71	10-may.-17
Proyecto 5	Modificación de parámetros de corte	15-mar.-17	36	20-abr.-17
Proyecto 6	Análisis de resultados	26-abr.-17	35	31-may.-17
Proyecto 7	Búsqueda de información	1-jun.-17	49	19-jul.-17
Proyecto 8	Elaboración de la memoria	5-jun.-17	67	11-ago.-17
Proyecto 9	Revisión de la memoria	11-ago.-17	28	8-sept.-17
Proyecto 10	Tutorías	2-feb.-17	217	7-sept.-17

Tabla 1. Actividades realizadas en el presente proyecto.

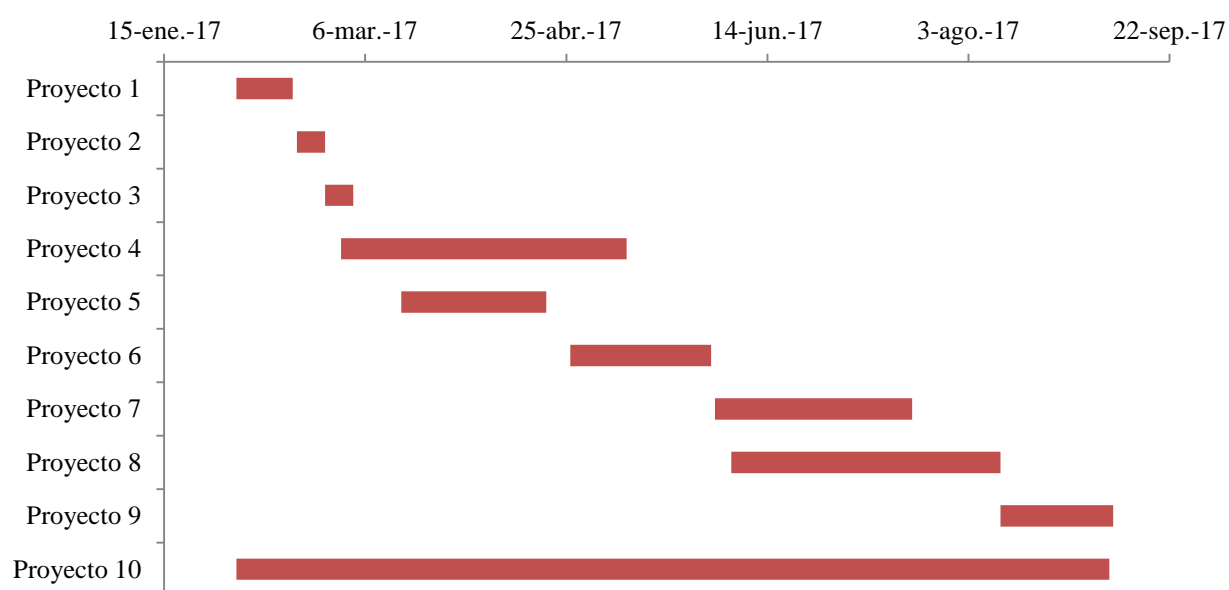


Figura 2. Diagrama de Gantt

1.4 Herramientas empleadas

Para la realización de las simulaciones numéricas se emplea el *software* de elementos finitos ABAQUS/*Explicit*, una herramienta de cálculo muy utilizada para la obtención de resultados aproximados de numerosos problemas en ingeniería, los cuales presentan mucha dificultad para

resolverse con métodos matemáticos tradicionales. El uso de estos últimos implicaba utilizar prototipos que después se ensayaban y mejoraban de manera iterativa y, en consecuencia, provocaban un gran coste económico y de tiempo [5].

Por lo tanto, con el uso de este modelo numérico, se pretende reducir el tiempo y los costes que conlleva la realización de ensayos experimentales y se obtienen resultados que, pese a no ser exactos, son suficientemente aproximados para resolver estos problemas. Este programa permite modificar parámetros, geometrías, condiciones de contorno,... y obtener unos resultados válidos de manera rápida y sencilla.

1.5 Estructura de la memoria

Los diferentes apartados de la presente memoria están organizados en capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo I, Introducción: este es un capítulo introductorio en el que, como se ha mencionado anteriormente, se presentan los motivos y objetivos del trabajo, sus fases y los medios empleados. En este apartado 1.5 Estructura de la memoria se indica la estructura que se ha seguido en la memoria y el siguiente está dedicado al marco regulador.

Capítulo II, Estado del arte: en este capítulo se establecen los fundamentos teóricos sobre los que se centra el presente proyecto. Se hace mención al acero en general, a sus características, a su clasificación y se determinan las propiedades del acero AISI 1050. Además, se explica el proceso de mecanizado, los parámetros de corte, la morfología de la viruta,...profundizando en las características que presenta el corte ortogonal. Por último, se explica el método de elementos finitos.

Capítulo III, Estudio experimental: en este capítulo se pretende recopilar todos los datos experimentales obtenidos del mecanizado por corte ortogonal del acero AISI 1050 hasta el momento, con la finalidad de poder compararlos con los resultados del modelo empleado y proceder a su validación.

Capítulo IV, Modelo numérico: en este capítulo se especifica el modelo numérico que se ha empleado en el programa ABAQUS/Explicit para realizar todas las simulaciones numéricas. Además, se determinan los parámetros fijos para simular y aquellos que se han modificado para realizar el estudio de su influencia sobre los resultados obtenidos. Por último, se describen las simulaciones realizadas y el modelo constitutivo empleado.

Capítulo V, Validación y resultados: en este capítulo se procede a validar el modelo utilizado, comparando los resultados que se han obtenido con los disponibles en la literatura. Además, se estudia la influencia que tienen unos parámetros en otros, atendiendo a las diferentes modificaciones que se han realizado en cada simulación.

Capítulo VI, Entorno socioeconómico y presupuesto: en este capítulo se presenta el presupuesto y el impacto socio-económico que supone la elaboración de este trabajo.

Capítulo VII, Conclusiones y futuros trabajos: en este último capítulo se recopilan todas las conclusiones que se obtienen al realizar el estudio de cada parámetro en detalle. Por último, se plantean trabajos futuros que completen el estudio del comportamiento del acero AISI 1050 en el proceso de mecanizado en corte ortogonal o perfeccionen otros realizados previamente.

1.6 Marco regulador

El presente proyecto trata de estudiar el comportamiento de mecanizado por corte ortogonal del acero AISI 1050, mediante el *software* ABAQUS/*Explicit*, en el que se lanzan simulaciones con la finalidad de obtener unos resultados que se puedan comparar con los datos experimentales y validar el modelo numérico empleado.

Por lo tanto, estas simulaciones numéricas ofrecen la posibilidad de estudiar teóricamente los procesos de conformación por arranque de viruta y permiten reducir el número de ensayos experimentales que se deben realizar. Esto puede ser directamente aplicable en la industria, con el objetivo de disminuir el coste que implica la utilización de prototipos para analizar, además de ahorrar en tiempo y, en consecuencia, aumentar su productividad y eficiencia.

Por último, todos estos trabajos teóricos que implican el estudio del comportamiento de un material al ser mecanizado y la influencia de sus parámetros en los resultados, empleando un modelo numérico, pueden ser publicados en conferencias, artículos científicos,...con la finalidad de difundir esta metodología propuesta en la comunidad científica, facilitar el progreso y avanzar en estos temas de investigación.

CAPÍTULO II

2. Estado del arte

En este apartado se introducen las bases teóricas y los conceptos generales a tener en cuenta en el desarrollo y entendimiento de este proyecto.

Para ello, se estructura este capítulo en varios apartados: el acero, el mecanizado y el método de elementos finitos (MEF). En primer lugar, se mencionan las generalidades del acero y su clasificación, además de destacar las características que presenta el acero AISI 1050, material empleado para realizar las simulaciones numéricas. De la misma manera, se hace mención al proceso de mecanizado en general, profundizando en el corte ortogonal. Por último, se describe el método de elementos finitos, que es el método de cálculo que utiliza el programa ABAQUS/Explicit, empleado en el desarrollo de este proyecto.

2.1 Los aceros

2.1.1 Generalidades del acero

Actualmente, el acero es la aleación metálica más conocida, no habiendo existido previamente un material que haya contribuido tanto al avance de la humanidad. La difusión del acero no solo se debe a las propiedades que presenta sino también a la existencia de numerosos yacimientos de minerales ricos en hierro y al desarrollo de procesos simples de fabricación que permiten la producción a precios económicos de grandes cantidades de acero. Pocos objetos se realizan sin este material o sin su ayuda. Las máquinas, los ferrocarriles, los automóviles, las instalaciones,...que están presentes en nuestra vida cotidiana, se fabrican con este material. Además, no existe ningún otro que presente propiedades tan notables como el acero, lo que le hace único para muchas aplicaciones.

Entre las propiedades que se destacan del acero están su gran plasticidad y maleabilidad a temperaturas altas, lo que permite transformar su forma y adquirir dimensiones determinadas. Además, presenta gran ductilidad, forjabilidad y se trabaja muy bien en frío, pudiendo formarse láminas, hilos, flejes,...de pequeño espesor. Por otro lado, el acero se suelda fácilmente y mediante presión y contacto se pueden unir dos trozos de acero que se encuentran a altas temperaturas. Otra propiedad a destacar de los aceros, es su capacidad de conseguir aumentar su dureza mediante un proceso de temple, pudiendo transformarse de un estado blando y maleable a otro duro y con alta resistencia. Además, tanto el hierro como el acero tienen precios bajos frente a otros metales. Sin embargo, el acero presenta otros inconvenientes como son la oxidación si se exponen al agua y al aire de manera simultánea, o la corrosión si se trata de agua salina, además de ser un alto transmisor de corriente y calor.

Hasta mediados del siglo XIX, solo existían dos tipos de aleaciones de hierro forjables: el hierro dulce, con un porcentaje de carbono entre el 0.04 y el 0.20%, muy utilizado en la fabricación de automóviles, máquinas, verjas, etc. y el acero, con un porcentaje de carbono entre 0.8 y 1.5 %, empleado en la creación de armas y herramientas. La diferencia entre ambos se encontraba en la dureza: mientras que el hierro dulce es blando, el acero es duro, alcanzando una dureza mayor si se temple.

En la actualidad, sin embargo, existen muchos tipos de aceros de las más diversas composiciones y propiedades, y cualquier acerería moderna fabrica más de cien tipos de aceros

diferentes, dependiendo fundamentalmente de sus propiedades de la composición, sus características y los tratamientos térmicos que se les aplique [\[6\]](#).

2.1.2 Clasificación de los aceros

El acero se puede clasificar de varias maneras atendiendo a su composición química, a su porcentaje en carbono, a sus propiedades y a sus aplicaciones.

1. Según su composición química, se dividen en:

1.1. *Aceros al carbono*: Estos aceros solo tienen carbono y no presentan otros elementos de aleación en proporciones significativas.

1.1.1 *Aceros de bajo carbono* ($\%C < 0.25$)

1.1.2 *Aceros de medio carbono* ($0.25 < \%C < 0.55$)

1.1.3 *Aceros de alto carbono* ($0.55 < \%C < 2$)

1.2. *Aceros aleados*: Estos aceros no solo tienen carbono, sino también elementos de aleación.

1.2.1 *Aceros de baja aleación* (elementos aleantes $< 5\%$)

1.2.2 *Aceros de alta aleación* (elementos aleantes $> 5\%$)

1.3. *Aceros inoxidables*: estos aceros contienen más del 15 % de cromo y presentan una excelente resistencia a la corrosión.

2. Según su contenido en carbono, se clasifican en:

2.1. *Aceros extrasuaves*: el contenido de carbono está entre 0.1 y 0.2%.

2.2. *Acero suaves*: el contenido de carbono varía entre 0.2 y 0.3%.

2.3. *Aceros semisuaves*: el contenido de carbono está entre 0.3 y 0.4%.

2.4. *Aceros semiduros*: el contenido de carbono está entre 0.4 y 0.5 %.

2.5. *Aceros duros*: el contenido de carbono está entre 0.5 y 0.6 %.

2.6. *Aceros extraduros*: el contenido de carbono está entre 0.6 y 0.7%.

3. Según sus propiedades, se clasifican en:

3.1. *Aceros especiales*

3.2. *Aceros inoxidables*

3.3. *Aceros de baja aleación ultrarresistentes*

3.4. Aceros galvanizados

4. Según su uso, se dividen en:

- 4.1. *Aceros para herramientas*: en este grupo están incluidos los aceros que se utilizan para fabricación de herramientas que modifican la forma y las dimensiones de los materiales.
- 4.2. *Aceros para construcción*: en este tipo se incluyen aquellos que se emplean para la industria de la construcción.
- 4.3. *Acero estructural*: en este grupo están incluidos los aceros empleados en la construcción de estructuras, como edificios industriales y comerciales, puentes y muelles [\[7\]](#).

2.1.3 AISI 1050

2.1.3.1. Propiedades del acero AISI 1050

Las propiedades del acero AISI 1050 se presentan en la *tabla 2*:

PROPIEDADES	PIEZA DE TRABAJO
DENSIDAD [kg/m^3]	7850
CONDUCTIVIDAD [$\text{W/m} \cdot \text{K}$]	49.8
MÓDULO DE YOUNG [GPa]	210
COEFICIENTE DE POISSON []	0.3
COEFICIENTE DE EXPANSIÓN [$1/\text{K}$]	10^{-6}
CALOR ESPECÍFICO [$\text{J/kg} \cdot \text{K}$]	486
TEMPERATURA DE FUSIÓN [K]	1783
DUREZA BRINELL	217

Tabla 2. Propiedades del acero AISI 1050 [\[8\]](#).

2.1.3.2. Composición del acero AISI 1050

En la composición del acero, el principal constituyente es el hierro, con una pequeña proporción de carbono, aunque también puede presentar otros elementos como el manganeso,

el silicio, el fósforo y el azufre. El contenido de cada uno de ellos es determinante en sus características y en el tipo de acero que es. Así la composición química del acero AISI 1050 es:

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%) <	S (%) <
0.48-0.55	0.1-0.6	0.6-0.9	0.04	0.05

Tabla 3. Composición química del acero AISI 1050 [9].

Cada elemento tiene influencia en el acero:

- A mayor contenido de carbono aumenta la templabilidad, la resistencia, la dureza y la resistencia al desgaste. Por otro lado, se reduce la ductilidad, la tenacidad y la soldabilidad.
- El silicio mejora la resistencia, la dureza y la resistencia a la corrosión, así como la conductividad eléctrica. Sin embargo, reduce la maquinabilidad y la capacidad de conformación en frío.
- El manganeso mejora la templabilidad, la resistencia mecánica, la resistencia a la abrasión y la maquinabilidad. Por otro lado, reduce la fragilidad en caliente y la soldabilidad, además de que desoxida el acero fundido.
- El fósforo mejora la resistencia, la resistencia a la corrosión, la maquinabilidad y la templabilidad, mientras que reduce severamente la ductilidad y tenacidad.
- El azufre mejora la maquinabilidad al combinarse con el manganeso, aunque reduce la resistencia al impacto y la ductilidad, y perjudica la calidad superficial la soldabilidad [10].

2.1.3.3. Características del acero AISI 1050

Según la norma AISI-SAE (American Iron Steel Institute – Society of Automotive Engineers), los aceros se pueden designar según un sistema numérico. Este sistema aporta los porcentajes principales de los elementos de la aleación. Así, cada dígito tiene un significado:

1. *Primer dígito*: indica la aleación principal.
2. *Segundo dígito*: modificación de la primera.
3. *Tercer y cuarto dígito*: cantidad de carbono en centésimas.

Así, la *tabla 4* muestra la clasificación de acero según la norma AISI-SAE:

DESIGNACIÓN	TIPO
10XX	Aceros ordinarios al carbón
11XX	Aceros al carbono re sulfurados de fácil maquinado
13XX	Aceros con 1.75% de Mn (1.5-2%)
15XX	Aceros al manganeso (1.0-1.65%)
23XX	Aceros al níquel, 3.5% de Ni (3.25-3.75%)
25XX	Aceros al níquel, 5% de Ni (4.75-5.25%)
31XX	Aceros al níquel-Cromo, 1.25% Ni y 0.65% Cr
33XX	Aceros al níquel-Cromo, 3.5% Ni y 1.60% Cr
40XX	Aceros al molibdeno, 0.25% Mo.
41XX	Aceros con Cr (0.4-1.2%), Mo (0.08-0.25%)
43XX	Aceros al Ni-Cr-Mo (1.8%Ni, 0.65%Cr, 0.25%Mo)
44XX	Molibdeno, (0.4-0.53%)
45XX	Molibdeno, (0.55%)
46XX	Níquel- Molibdeno, (1.8%Ni, 0.2%Mo)
47XX	Níquel- Cromo- Molibdeno, (1.05%Ni, 0.45%Cr, 0.2%Mo)
48XX	Níquel- Molibdeno, (3.5%Ni, 0.25%Mo)
50XX	Aceros al Cromo (bajo cromo, 0.28-0.40%)
51XX	Medio Cromo, (0.8-1.05%)
50XXX	Acero resistente al desgaste, 0.5%Cr
51XXX	Acero resistente al desgaste, medio Cr 1%
52XXX	Acero resistente al desgaste, alto Cr 1.45%
61XX	Aceros al Cromo-Vanadio, (0.75% Cr, 0.15%V)
8XXX	Aceros de triple aleación
81XX	0.3%Ni, 0.4%Cr, 0.12%Mo
86XX	0.55%Ni, 0.50%Cr, 0.20%Mo
87XX	0.55%Ni, 0.50%Cr, 0.25%Mo
88XX	0.55%Ni, 0.50%Cr, 0.35%Mo
92XX	Acero al Silicio-Manganeso, (2%Si y 0.8%Mn)
93XX	Aceros de triple aleación, 3.25%Ni, 1.2%Cr, 0.12%Mo
98XX	Aceros de triple aleación, 1%Ni, 0.8%Cr, 0.25%Mo
XXBXX	Aceros con Boro, (mínimo 0.0005% B)
50BXX	0.5%Cr
51BXX	0.8%Cr
81BXX	0.3%Ni, 0.45%Cr, 0.12%Mo
XXBVXX	Acero al Boro-Vanadio
XXLXX	Acero con plomo
XXXH	Acero con banda de templabilidad
EX	Nuevos tipos de acero con designación temporal

Tabla 4. Clasificación de los aceros según la norma AISI [11].

Según el primer dígito, los aleantes principales son:

IDENTIFICADOR	ALEANTES
1	MANGANESO
2	NIQUEL
3	NIQUEL-CROMO (Principal aleante el cromo)
4	MOLIBDENO
5	CROMO
6	CROMO-VANADIO (Principal aleante el cromo)
7	NIQUEL-CROMO-MOLIBDENO (Principal aleante el molibdeno)
8	NIQUEL-CROMO-MOLIBDENO (Principal aleante el níquel)

Tabla 5. Aleantes principales del acero según el primer dígito (Fuente: [11]).

Por lo tanto, en el acero AISI 1050 se observa que el primer número es 1, por lo que se trata de un acero de carbono cuyo aleante principal es el manganeso; si el segundo dígito es el 0, con una designación 10XX, es un acero ordinario al carbono (no hay modificadores). Por lo tanto,

el acero 1050 quiere decir que se trata de un acero al carbono con 0.50 %C, con un porcentaje medio de este elemento. Debido a la buena penetración de temple que tiene este acero, se considera un material apto para piezas de máquinas que tengan que soportar esfuerzos altos, longitudinales y transversales, pero sin impactos continuos. Si las piezas son de pequeño espesor, el temple se debe realizar con aceite, mientras que si las piezas son más sencillas y presentan un espesor mayor, el temple se debe realizar con agua [\[12\]](#).

2.1.3.4. Aplicaciones del acero AISI 1050

Como se ha mencionado anteriormente, el acero se emplea como base para el desarrollo de industrias como la naval, la construcción de edificios, la fabricación de automóviles, para maquinaria y herramientas, además de para el equipamiento doméstico. En el sector del automóvil, el acero se emplea para máquinas, las carrocerías de los automóviles, los cascos de barcos, los tubos de las bicicletas,... En el sector de la construcción se emplea en estructuras de estaciones y casas o puentes,... En el ámbito cotidiano, se puede encontrar en las cerraduras de las puertas, alfileres, asientos,... [\[13\],\[14\]](#).

Las aplicaciones principales para aceros de medio carbono, y en especial para el acero AISI 1050 que presenta una buena combinación de propiedades mecánicas, son en aquellas que requieren más resistencia que la necesaria para aceros de bajo contenido en carbono, en piezas de equipo de maquinaria automotriz y equipo agrícola (en engranajes, cigüeñales, ejes, bielas, levas y válvulas, muelles, arandelas, discos de freno...), en equipo de ferrocarriles, así como en piezas para maquinaria de trabajado de metales [\[10\]](#).



Figura 3. Ejemplos de aplicaciones de acero al carbono [\[15\]](#), [\[16\]](#).

2.2 Mecanizado

2.2.1 Definición

El mecanizado tiene como objetivo principal cortar un material, generalmente metálico, para obtener un tamaño y una forma específicos. Este proceso se lleva a cabo mediante el arranque de viruta, es decir, eliminando el material de la pieza en forma de virutas. En este sentido, la forma y el tamaño de esta juegan un papel muy importante, en especial en procesos de alto grado de automatización. La rotura de la viruta debe provocarse de manera correcta para mantener un tamaño uniforme. Además, a medida que se va formando, esta se retira, manteniendo limpia la zona de operación de corte y disipando el calor generado durante el proceso.

El mecanizado por arranque de material provoca el consumo de un mayor número de recursos, de energía y un desperdicio del material. Es por eso que se están empezando a diseñar piezas que no necesiten ser mecanizadas. Aunque el 90% de las máquinas de fabricación actuales se destinan a operaciones de arranque de material, lo que indica que son máquinas imprescindibles, existe una tendencia hacia el diseño de piezas de trabajo con formas muy similares a la final [17].

2.2.2 Proceso de fabricación

En los procesos de arranque de viruta, se consiguen las dimensiones y el acabado superficial requerido, eliminando parte del material por medios mecánicos y con herramientas de filo. En las herramientas que se emplean en fabricación, el filo es el que arranca la viruta, y dependiendo de estos, los procesos de fabricación se pueden dividir en:

1. *Procesos de arranque con filos geoméricamente determinados*: los filos de las herramientas de corte tienen una geometría determinada. Entre ellos destacan el cepillado y el fresado.

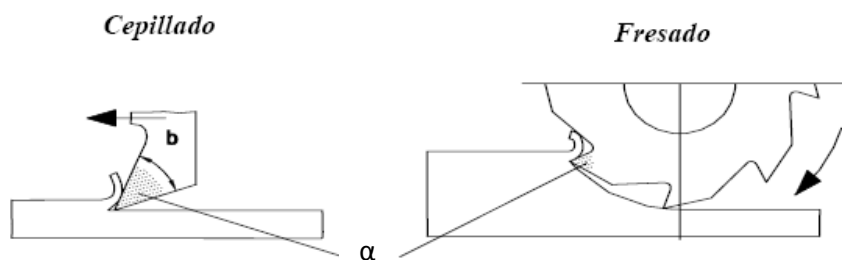


Figura 4. Arranque de viruta con filos geoméricamente determinados [19].

2. *Procesos de arranque con filos no determinados*: los filos de las herramientas de corte no tienen una geometría determinada, por lo que se arrancan las virutas con granos abrasivos. Entre este tipo de procesos destaca el rectificado.

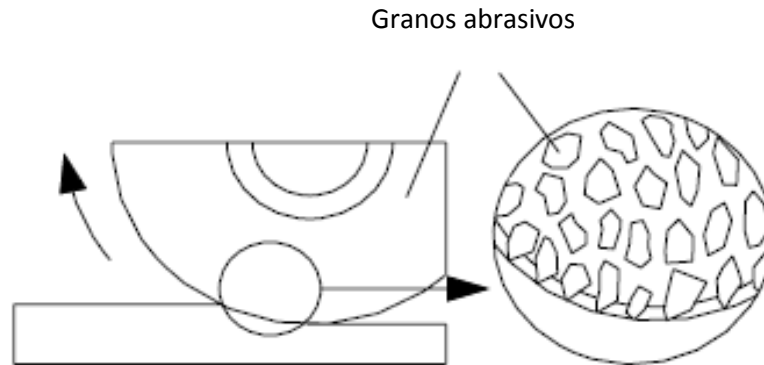


Figura 5. Arranque de viruta con filo de forma geoméricamente indeterminada [19].

2.2.3 Movimientos de arranque de viruta

Con el objetivo de arrancar la viruta, debe existir un movimiento relativo entre la herramienta de corte y la pieza, de forma que exista una interacción entre ellas. Esto se consigue de tres maneras diferentes:

1. Se mantiene la pieza quieta y se mueve la herramienta.
2. Se mantiene la herramienta quieta y se mueve la pieza.
3. Se mueve la pieza y herramienta.

Existen varios movimientos en el proceso de arranque de viruta (*figura 6*):

1. *El movimiento de corte*: sin movimiento de avance, arranca viruta únicamente durante una carrera (si el movimiento es rectilíneo) o durante una revolución (si el movimiento es circular). El cepillado es un ejemplo de movimiento de corte rectilíneo mientras que el torneado o fresado, es un ejemplo de movimiento de corte circular.
2. *El movimiento de avance*: se combina con el de corte para que se produzca el arranque continuo de viruta.
3. *El movimiento de penetración*: determina la profundidad de corte y, en consecuencia, el espesor de la viruta.
4. *El movimiento de aproximación*: no es un movimiento de mecanizado en sí, sino que engloba todos los movimientos que realiza la herramienta antes de que se realice el contacto con la pieza y comience el mecanizado [20].

En la *figura 6* se indican con flechas cada uno de los movimientos en los diferentes procesos, correspondiendo cada número con la clasificación realizada anteriormente.

Los elementos que intervienen en el proceso son: *máquina-herramienta*, *herramientas de corte* y *elementos de sujeción*.

En función del movimiento relativo entre la pieza y la herramienta, existen varios procesos entre los que destacan el fresado, el torneado y el taladrado.

- *Fresado*: en este proceso la herramienta, denominada fresa, tiene el movimiento de corte, girando sobre su eje. Por su parte, la pieza realiza el movimiento de avance, ya que está fijada sobre la mesa de la fresadora que realiza este movimiento. Así se consigue obtener la geometría y dimensiones necesarias.
- *Torneado*: la máquina-herramienta de este proceso, el torno, es la más usada generalmente. La pieza está fijada al plato del torno, que gira sobre su eje, realizando el movimiento de corte. Por su parte, el filo de la herramienta realiza el movimiento de avance, arrancando el material hasta alcanzar las dimensiones deseadas.
- *Taladrado*: en este proceso, la pieza está fijada a la mesa del taladro, mientras que la herramienta, denominada broca, es la que se encarga de realizar el movimiento de corte girando sobre su propio eje y el movimiento de avance lineal. Así, se realiza el mecanizado del agujero o taladro, con el diámetro y la profundidad que se desee [\[18\]](#).

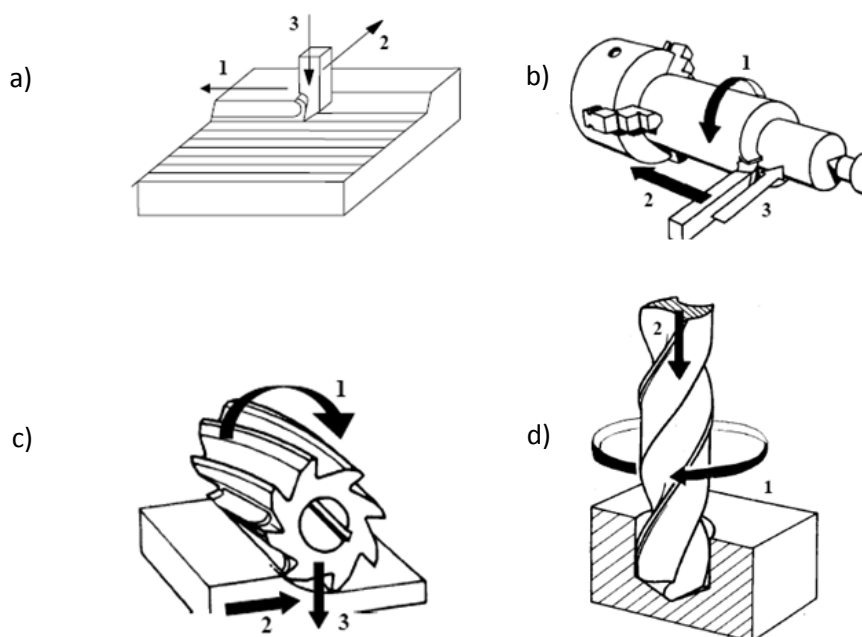


Figura 6. Movimiento de: (a) Cepillado; (b) Cilindrado; (c) Fresado; (d) Taladrado [\[19\]](#).

Los procesos de arranque la viruta implican la rotura del material. Dicha rotura dependen del tipo de material que se esté tratando. Si se trata de un material quebradizo, este se rompe en trozos grandes. Si se trata de un material dúctil, este puede sufrir un estiramiento antes de romperse. En las operaciones de corte de material, se produce la rotura de las uniones internas, que dependen de las propiedades del propio material, las propiedades que presenta la herramienta de corte y la velocidad a la que se produce dicho corte.

La rotura comienza a nivel microscópico. Los planos que existen entre átomos deslizan unos sobre otros hasta provocar la rotura del material, cuando sobre un material dúctil se aplica una fuerza. El material que se desprende de la superficie es la viruta. La calidad que tiene el proceso depende de dos factores importantes:

1. *La temperatura que se alcanza en el proceso:* si la temperatura es demasiado alta puede provocar efectos negativos tanto en la pieza como en la herramienta.
2. *Las fuerzas aplicadas:* afectan a la fuerza y a la potencia que se necesitan para desarrollar el proceso.

Es importante diseñar de manera correcta el filo de corte, de forma que se pueda controlar, en determinadas condiciones de mecanizado, ciertos parámetros como son la temperatura, las fuerzas y la formación de viruta. Así, este control influirá de manera directa en la vida de la herramienta y en la seguridad del proceso [\[17\]](#).

2.2.4 Variables del proceso

En los procesos de corte existen variables independientes y dependientes.

Entre las variables independientes están:

1. El material, los recubrimientos y el estado de la herramienta de corte.
2. La forma, el acabado superficial y el filo de la herramienta de corte.
3. Material, estado y temperatura de la pieza.
4. La velocidad de corte, avance y profundidad de corte.
5. El fluido de corte.
6. La rigidez y amortiguamiento (características de la máquina herramienta).
7. Sujeción y soporte de la pieza.

Entre las variables dependientes, que se ven afectadas por cambios en las variables independientes, se encuentran:

1. El tipo de viruta que se produce.
2. La fuerza y la energía que se disipan en el corte.
3. El aumento de temperatura de la pieza, la viruta y la herramienta.
4. El desgaste de la herramienta.
5. Acabado superficial de la pieza tras ser mecanizada.

Los factores que influyen en el proceso de corte se describen en la *tabla 6*:

PARÁMETRO	INFLUENCIA E INTERRELACIONES
Velocidad de corte, profundidad de corte, avance, fluidos de corte	Fuerzas, potencia, aumento de temperatura, vida de herramienta, tipo de viruta, acabado superficial.
Ángulo de herramientas	Igual que arriba; influencia sobre la dirección de flujo de viruta; resistencia de la herramienta al desportillamiento.
Viruta continua	Buen acabado superficial; fuerza estables de corte; indeseable en maquinado automatizado.
Viruta de borde acumulado	Mal acabado superficial; si el borde acumulado es delgado, puede proteger las superficies de la herramienta.
Viruta discontinua	Preferible para facilitar el desecho de viruta; fuerzas fluctuantes de corte; puede afectar al acabado superficial y causar vibración y traqueteo.
Aumento de temperatura	Influye sobre la vida de la herramienta, en especial sobre el desgaste del cráter y la exactitud dimensional de la pieza; puede causar daños térmicos a la superficie de la pieza.
Desgaste de herramienta	Influye sobre el acabado superficial, la exactitud dimensional, aumento de temperatura, fuerzas y potencia.
Maquinabilidad	Se relaciona con la vida de la herramienta, el acabado superficial, las fuerzas y la potencia.

Tabla 6. Factores que influyen sobre el proceso de corte (Fuente:[2]).

2.2.5 Magnitudes de corte y de virutas producidas

Los parámetros de corte son los valores que se deben ajustar para conseguir la optimización del proceso de arranque de viruta. Estos influyen de manera diferente en la acción de corte, de operación y en los resultados. Las magnitudes de corte son:

1. *Velocidad de corte* (V_c): es la velocidad lineal relativa que presenta la herramienta de corte con respecto a la pieza, en la misma dirección y sentido del movimiento de corte, definido anteriormente. Esta magnitud se mide en metros por minuto. Si el corte se produce a velocidades altas, la herramienta se desgasta más rápidamente, mientras que si se trabaja a velocidades bajas, se reduce la productividad. Este parámetro depende del material de la pieza, de la herramienta, de la sección de la viruta, de la refrigeración, del tipo de construcción de la máquina,...

A partir del valor de la velocidad de corte, se obtiene las revoluciones por minuto (n) a las que gira la pieza o la herramienta, dependiendo del proceso. Existe una relación entre la velocidad de corte y las revoluciones por minuto:

$$V_c = \frac{\pi \cdot n \cdot D}{1000}$$

donde:

V_c = Velocidad de corte en m/min.

D = Diámetro de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado, taladrado) en mm.

n = Revoluciones de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado, taladrado) en un minuto (r.p.m.).

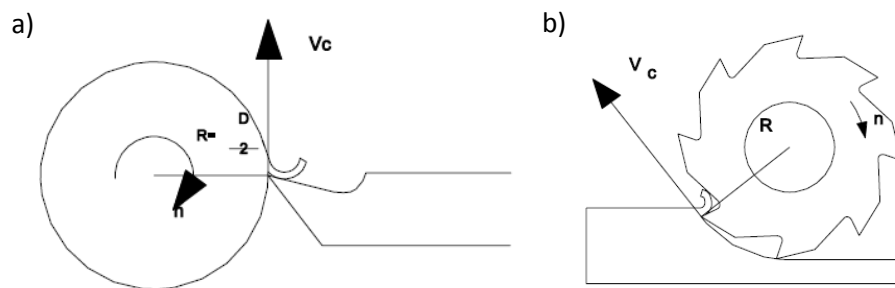


Figura 7. Velocidad de corte en el: (a) Torneado; (b) Fresado [19].

2. *Avance* (a): es el desplazamiento relativo herramienta-pieza en cada carrera o en cada revolución. Esta magnitud se expresa en milímetros (mm). A partir del avance (a en mm) y la velocidad de giro (n en r.p.m.), se obtiene la velocidad de avance (V_a), que se expresa en milímetro por minuto (mm/min). Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$V_a = a \cdot n$$

3. *Profundidad de corte* (p): es la distancia que penetra la herramienta en la pieza. Se expresa en milímetros. A partir de este parámetro y el avance (a) se obtiene otro parámetro importante: la sección de viruta (S), que se expresa en milímetros cuadrados (mm^2). La expresión que representa la sección de la viruta es:

$$S = a \cdot p$$

2.2.6 Corte ortogonal

El proceso de mecanizado mediante corte ortogonal se caracteriza porque el filo de la herramienta es perpendicular a la dirección del movimiento relativo entre la herramienta y la viruta, es decir, perpendicular a la velocidad de corte. Sin embargo, en la mayoría de los casos, existe un ángulo entre el filo y la dirección de la velocidad de corte, como ocurre con la mayoría de las operaciones de torneado y fresado. El filo está inclinado un ángulo i con respecto a la perpendicular a la velocidad de corte [\[21\]](#).

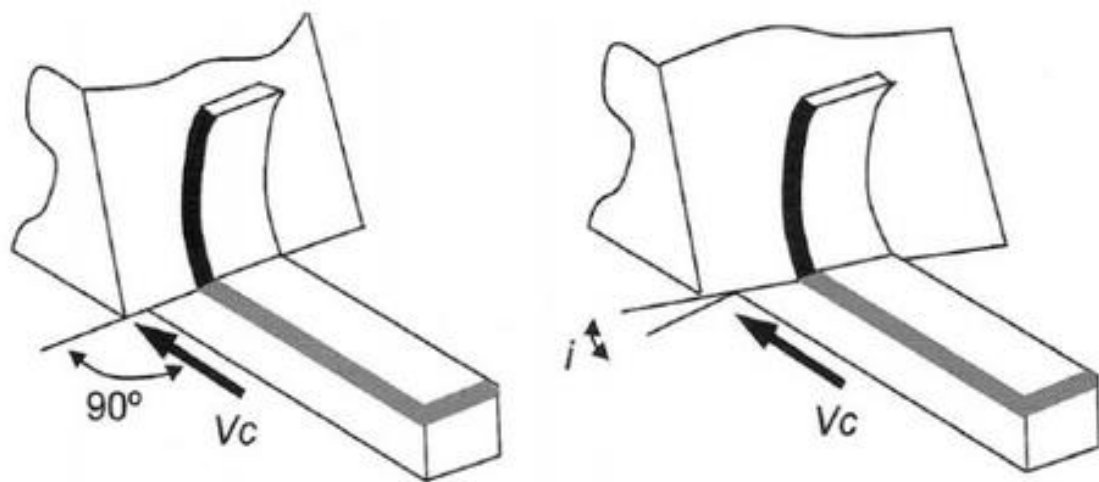


Figura 8. Corte ortogonal y oblicuo, con inclinación i [\[21\]](#).

En el corte ortogonal, los elementos de una herramienta son:

1. El filo cortante.
2. La superficie de ataque o desprendimiento, que es la cara de la herramienta y sobre ella desliza el material desprendido.
3. La superficie de la incidencia, que es la cara de la herramienta que queda frente a la superficie ya trabajada de la pieza [\[20\]](#).

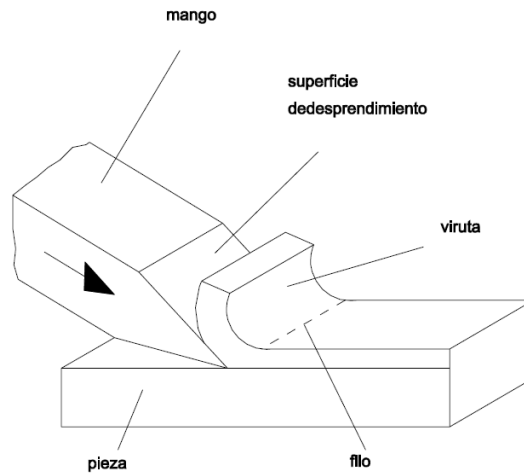


Figura 9. Herramienta manual de corte: buril [19].

2.2.6.1 Ángulos de las herramientas de corte

Las herramientas de corte están formadas por varias superficies y ángulos que influyen en el rendimiento del proceso. Entre los ángulos se encuentran:

1. *Ángulo de incidencia (α)*: es el ángulo formado por la superficie de incidencia y el plano que contiene a la velocidad de corte y al filo.
2. *Ángulo de filo o herramienta (β)*: es el ángulo formado por la superficie de incidencia y de desprendimiento.
3. *Ángulo de desprendimiento (γ)*: es el ángulo formado por la superficie de desprendimiento y el plano normal a la velocidad de corte y que contiene al filo.

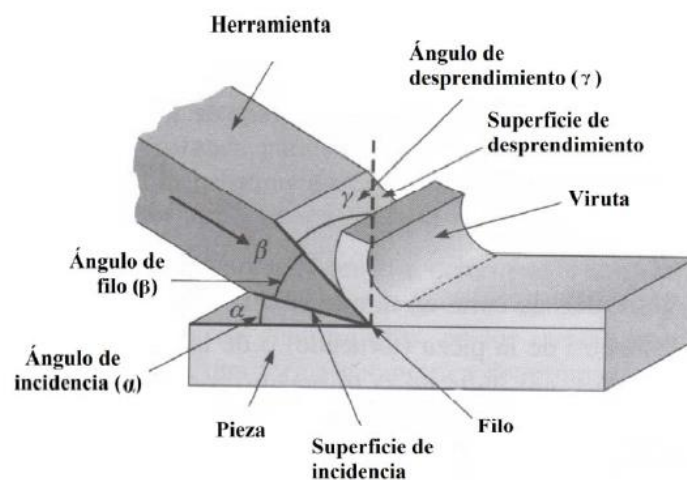


Figura 10. Ángulos en el corte ortogonal [19].

El contacto entre la pieza y la herramienta aumenta al disminuir el ángulo de incidencia y produce excesivo roce. Esto conlleva un aumento de la temperatura y, en consecuencia, un desgaste más rápido de la herramienta. Si este ángulo es grande, el filo de la herramienta se debilita. Para escoger este ángulo correctamente se debe tener en cuenta el material de la pieza y de la herramienta.

Un ángulo de desprendimiento grande hace que la herramienta penetre y corte de manera correcta la pieza, provocando un buen acabado superficial y un debilitamiento de la herramienta. Por el contrario, si este ángulo es pequeño, la resistencia a la herramienta aumenta, pero también el calentamiento de esta y la energía consumida. Además, depende de la resistencia del material de la pieza, de la herramienta y del avance. En función del valor de este ángulo, las herramientas de corte se clasifican en herramientas con geometría positiva o negativa. Un ángulo positivo favorece el mecanizado, mientras que si es un ángulo negativo, la herramienta va en contra del flujo y cuesta más mecanizar. En general, el ángulo de desprendimiento más adecuado será el mayor que la herramienta soporte sin que se rompa [20].

2.2.6.2 Velocidades en el corte ortogonal

Entre las velocidades que intervienen en el proceso de arranque de viruta se encuentran:

1. Velocidad de corte (V_c), ya comentada anteriormente.
2. Velocidad de deformación o cizallamiento (V_s), que es la velocidad a la que se rompe la viruta.
3. Velocidad de salida de la viruta (V_v), que es la velocidad de la viruta respecto de la herramienta.

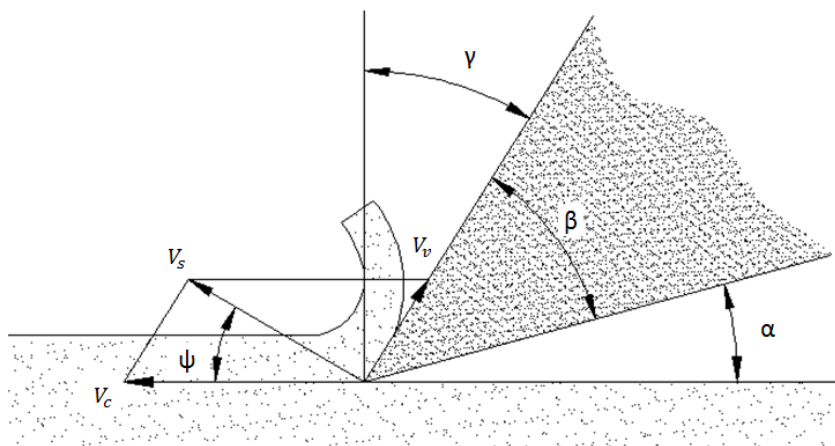


Figura 11. Velocidades en el corte ortogonal (Fuente: [20]).

2.2.6.3 Ángulo de cizallado (ψ)

El ángulo de cizallado es el que se emplea para cortar el material y formar viruta.

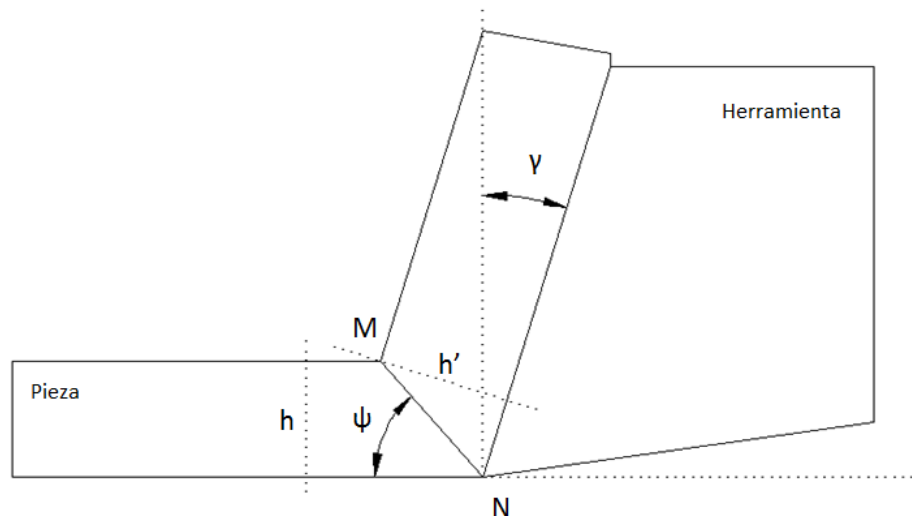


Figura 12. Ángulo de cizallamiento (Fuente: [20]).

Existe una relación entre el factor de recalcado (C_r), que es la relación entre la viruta deformada (h') y sin deformar (h), y el ángulo de cizallado.

$$h = MN \cdot \sen \psi$$

$$h' = MN \cdot \cos(\psi - \gamma)$$

Por lo tanto, el factor de recalcado:

$$C_r = \frac{h'}{h} = \frac{MN \cdot \cos(\psi - \gamma)}{MN \cdot \sen \psi} = \frac{\cos(\psi - \gamma)}{\sen \psi}$$

$$C_r \cdot \sen \psi = \cos(\psi - \gamma) = \cos \psi \cdot \cos \gamma + \sen \psi \cdot \sen \gamma$$

Por lo tanto:

$$\tg \psi = \frac{\cos \gamma}{C_r - \sen \gamma}$$

De esta manera, se relaciona el ángulo de cizallado (ψ) con el factor de recalcado (C_r) y el ángulo de desprendimiento (γ), que son valores que se conocen. Una vez conocido el ángulo de cizallamiento, se puede obtener el módulo de las velocidades de cizallamiento o deformación (V_s) y de la salida de viruta (V_v), a partir del teorema de seno.

La velocidad de salida de la viruta es:

$$V_v = V_c \cdot \frac{\sen \psi}{\sen (\gamma + \frac{\pi}{2} - \psi)}$$

La velocidad de cizallamiento es:

$$V_s = V_c \cdot \frac{\sen (\frac{\pi}{2} - \gamma)}{\sen (\gamma + \frac{\pi}{2} - \psi)}$$

2.2.6.4 Fuerzas de corte ortogonal

El material presenta unas fuerzas de reacción \bar{R} que no se aplican en el filo, sino en una zona que está tanto más alejada, cuanto más pequeño sea el ángulo de desprendimiento. El ángulo con el que se aplica esta fuerza ρ es, en principio, desconocido, pero la resultante \bar{R} se puede proyectar sobre las direcciones de las velocidades que aparecen en la *figura 11*.

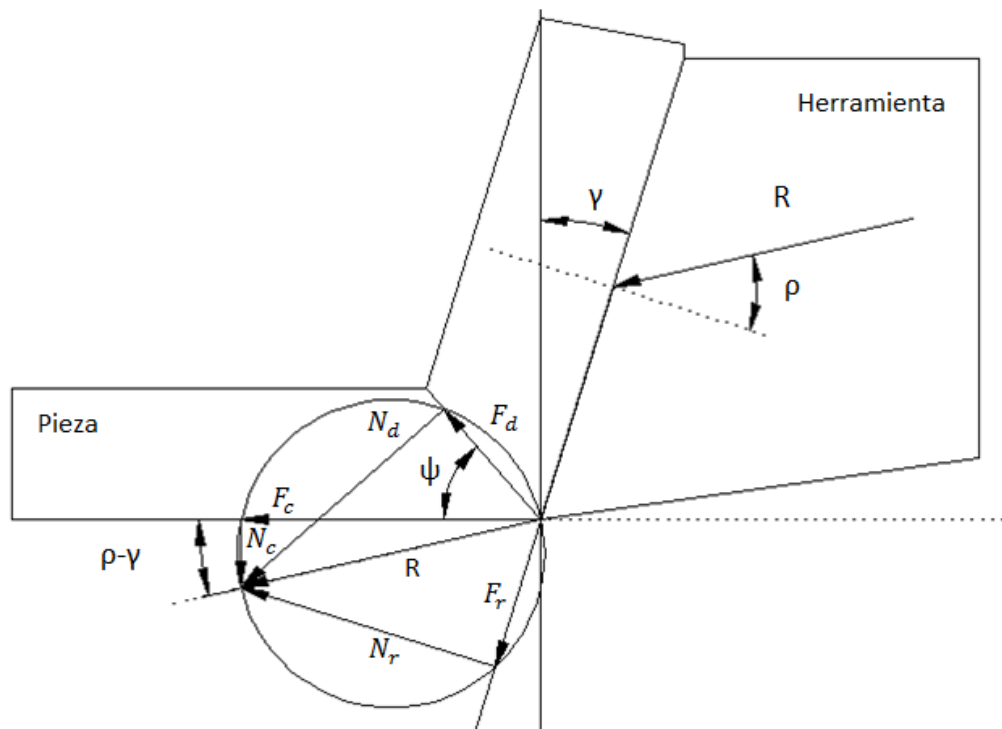


Figura 13. Fuerzas en el corte ortogonal (Fuente: [20]).

Por lo tanto, vectorialmente se obtiene:

$$\bar{R} = \bar{F}_c + \bar{N}_c = \bar{F}_r + \bar{N}_r = \bar{F}_d + \bar{N}_d$$

donde:

F_c = es la fuerza de corte, a partir de la cual se obtiene la potencia que se necesita.

F_d = es la fuerza de deslizamiento, a partir de la cual se obtienen las tensiones cortantes en el plano donde se crea la viruta.

F_r = es la fuerza de rozamiento entre la herramienta y la viruta.

A partir de la representación de las fuerzas:

$$F_c = R \cdot \cos (\rho - \gamma)$$

$$N_c = R \cdot \sin (\rho - \gamma)$$

$$F_d = R \cdot \cos (\psi + \rho - \gamma)$$

$$N_d = R \cdot \sin (\psi + \rho - \gamma)$$

$$F_r = R \cdot \sin \rho$$

$$N_r = R \cdot \cos \rho$$

A partir de F_r y N_r se obtiene el coeficiente de rozamiento entre la viruta y la herramienta:

$$\mu = \frac{F_r}{N_r} = \frac{\sin \rho}{\cos \rho} = \operatorname{tg} \rho$$

La fuerza de deslizamiento se obtiene multiplicando la resistencia a cortante (τ_s) por el área de deslizamiento (A_s) que está relacionado con la sección de la viruta sin deformarse (A_0).

$$F_d = \tau_s \cdot A_s = \tau_s \cdot \frac{A_0}{\sin \psi} = \tau_s \cdot \frac{a \cdot p}{\sin \psi}$$

Y se iguala con la expresión siguiente:

$$F_d = R \cdot \cos (\psi + \rho - \gamma)$$

Y despejando la tensión de cizallamiento:

$$R = \tau_s = \frac{A_0}{\sin \psi} \cdot \frac{1}{\cos (\psi + \rho - \gamma)}$$

En la fuerza de corte se obtiene que:

$$F_c = \tau_s \cdot \frac{A_0}{\sin \psi} \cdot \frac{\cos (\rho - \gamma)}{\cos (\psi + \rho - \gamma)}$$

Donde, salvo el ángulo ρ que es desconocido, pues:

τ_s = propiedad mecánica del material.

$A_0 = a \cdot p$; (producto del avance por la velocidad) sección sin deformar.

γ = ángulo de desprendimiento.

ψ = ángulo de cizallamiento que se obtiene a partir del ángulo de desprendimiento γ y el factor de recalcado C_r [20].

2.2.7 Secuencia de la formación

A pesar de que el movimiento de la viruta depende del material de la pieza que se va a mecanizar y de las condiciones de corte utilizadas, algunos investigadores han demostrado que a medida que se produce el proceso de mecanizado, y debido a la fricción, los siguientes pasos se suceden:

1. El metal sufre gran presión y altas temperaturas.
2. Una zona de estancamiento se produce en la punta del filo.
3. El metal que se deforma se une a la cara de desprendimiento de la herramienta formándose una película de recubrimiento.
4. La herramienta continúa eliminando material y en ciertas condiciones de mecanizado y para algunos materiales, se puede llegar a formar varias capas de material que se unen a la anterior en la zona de estancamiento. Esta capa de material se desliza sobre una película mayor que se adhiere a la superficie de desprendimiento de la herramienta, creándose el filo recrecido.
5. Alrededor de la zona de estancamiento se crea una zona de fluencia, de manera que la viruta sigue deslizando por la superficie de la herramienta.
6. La viruta desliza por la superficie de desprendimiento de la herramienta, debido a la cizalladura con una velocidad que comienza en cero en la superficie de cizallamiento

hasta valores más elevados en determinados puntos de la herramienta. En la zona estacionaria y de fluencia se genera más calor.

Por la superficie de desprendimiento se mueve la zona de fluencia, junto con la última capa que se forma, generándose de esa manera el filo de recrecimiento. Este filo afecta negativamente al mecanizado, ya que modifica el ángulo de desprendimiento, y habrá que minimizarlo variando las condiciones de corte. Cuando el recrecimiento se rompe en algún punto del proceso, se genera una nueva capa.

Todo esto se debe tener en cuenta con el corte ortogonal, donde el filo de corte es perpendicular a la dirección de la velocidad de corte. Sin embargo, la mayoría de los mecanizados son oblicuos, por lo que la dirección de la velocidad de corte forma un ángulo determinado con el filo de corte, lo que varía las condiciones geométricas y modifica la salida de la viruta [17].

2.2.8 Tipos de viruta

El arranque de material no es un proceso simple, sino que es una combinación de varios procesos:

1. *Cortadura o recalado*: el material se desplaza a medida que el filo penetra en la pieza.
2. *Corte*: Si el esfuerzo cortante es mayor que la resistencia de la pieza al corte del material, una parte de la viruta se corta.
3. *Fluencia o salida de viruta*: según sea el material, puede desprenderse la viruta o bien unirse una con otra y formar una viruta continua.

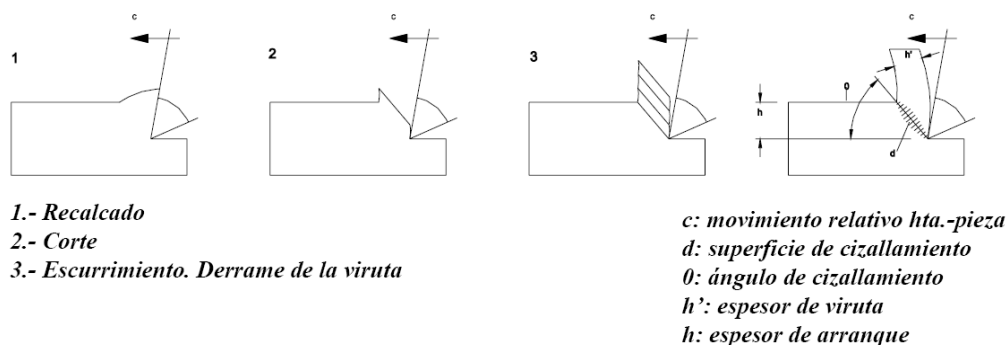


Figura 14. Proceso de formación de viruta [20].

Atendiendo a la viruta que se crea a partir de la operación de corte, se pueden encontrar varios tipos y longitudes. Por lo tanto, se pueden crear virutas discontinuas en materiales quebradizos

o espirales en los materiales dúctiles. El estudio de la formación y posterior rotura de la viruta ha ido evolucionando en los últimos años.

Los factores que influyen en la formación de viruta son los siguientes: las características físicas y químicas del material de la pieza, los parámetros de corte, el ángulo de posición de la herramienta, el radio de punta en el filo de corte y el avance.

Cada factor afecta de manera diferente y se explica su influencia a continuación:

1. Las características físicas y químicas del material de la pieza

La formación de la viruta depende directamente del tipo, la tenacidad, la estructura, la dureza, forma y tamaño del material. Con la deformación, se reduce la tenacidad, por lo que los aceros aleados se cortan con mayor dificultad que los metales no aleados. La maquinabilidad es la habilidad del material de ser mecanizado con una herramienta de corte. Hay factores que afectan a la maquinabilidad como la composición química del material de la pieza, el proceso metalúrgico de la pieza, los aditivos, las inclusiones, la composición mecánica, los tratamientos, la conductividad térmica y el estado superficial, así como factores de la herramienta como el tipo de operación, las condiciones en las que se trabaja, la máquina herramienta, la arista de corte o el portaherramientas.

2. Los parámetros de corte

Las fuerzas de corte, la resistencia de la herramienta, las temperaturas y las vibraciones son factores a tener en cuenta en el diseño de los medios si se estudia la rotura de la viruta para diferentes condiciones de corte.

3. El ángulo de posición de la herramienta

La formación de viruta está influida por el ángulo de posición de la herramienta, que puede ser de corte oblicuo u ortogonal. Al reducir el espesor de la viruta no deformada durante el corte oblicuo con un ángulo entre 45° y 60° , la formación de viruta es suave y ligera.

4. El radio de punta en el filo de corte

El radio de punta también afecta a la dirección y a la forma de la viruta y juega un papel importante en la geometría del filo. El radio de punta afecta a la profundidad de corte, de manera que cuando la profundidad de corte es menor, la viruta tiene forma de coma en su sección transversal, con un ángulo pequeño si se compara con el filo de corte. Si, por el

contrario, la profundidad es mayor, influye más el ángulo de posición del filo que el radio de punta, por lo que la salida de viruta hacia fuera se realiza en forma de espiral.

Por lo tanto, la geometría del radio de punta del filo influye en la acción del corte en materiales y profundidades diferentes. Se considera la resistencia del filo el factor más importante a tener en cuenta para su diseño. Esto implica un compromiso a la hora de tener que priorizar el factor más importante: la resistencia del filo o la potencia requerida, tenacidad frente a vida de la herramienta, optimización o versatilidad.

5. El avance

El movimiento de avance, junto con el movimiento de corte, provoca el arranque continuo de viruta y la consecuente creación de la superficie mecanizada. El ancho de viruta tanto en la sección transversal como a la salida, se ve afectada por el avance. Si se produce demasiada presión, la viruta suele tener una sección cuadrada, mientras que si la sección es rectangular, las virutas tienen forma de tiras que pueden ser peligrosas. La curva de la viruta es menor con la finalidad de obtener una viruta de mayor grosor. Con ello, la longitud de contacto aumenta, obteniéndose mayor presión y deformación. Demasiado grosor de la viruta provoca efectos negativos en el proceso de corte.

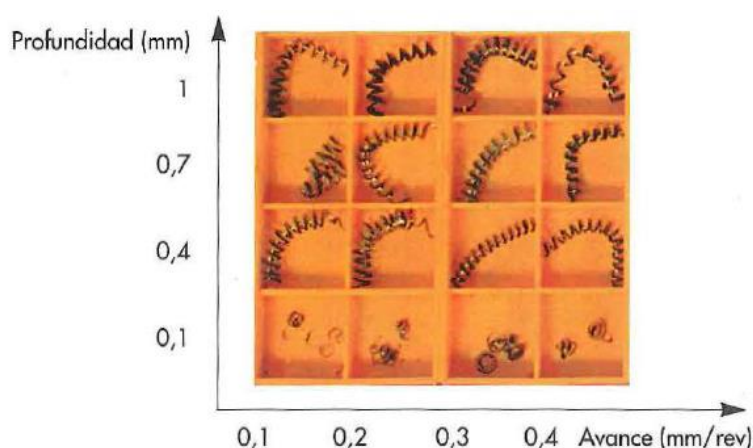


Figura 15. Variación de la forma de la viruta en función de distintos parámetros del proceso [17].

Con la figura 15 se observa cómo varía la forma de la viruta, modificando los parámetros de profundidad y avance. El control de la formación de la viruta es imprescindible en el mecanizado. Para diferentes parámetros de avance, tipo de material y profundidad, se desarrollan diferentes geometrías que proporcionan una formación de viruta adecuada [17].

La viruta que se produce afecta en el acabado superficial de la pieza, y en la operación general de corte. Se describen, por lo tanto, varios tipos:

1. Continua
2. Borde acumulado o recrecido
3. Escalonada o segmentada
4. Discontinua

La viruta tiene dos superficies a tener en cuenta: una que está en contacto con la herramienta y otra la superficie original de la pieza. Debido al frotamiento de la viruta al subir por la superficie de la herramienta, la cara de la viruta en contacto con ella es brillante, mientras que la otra, que no está en contacto con ningún cuerpo, presenta un aspecto rasgado y áspero.

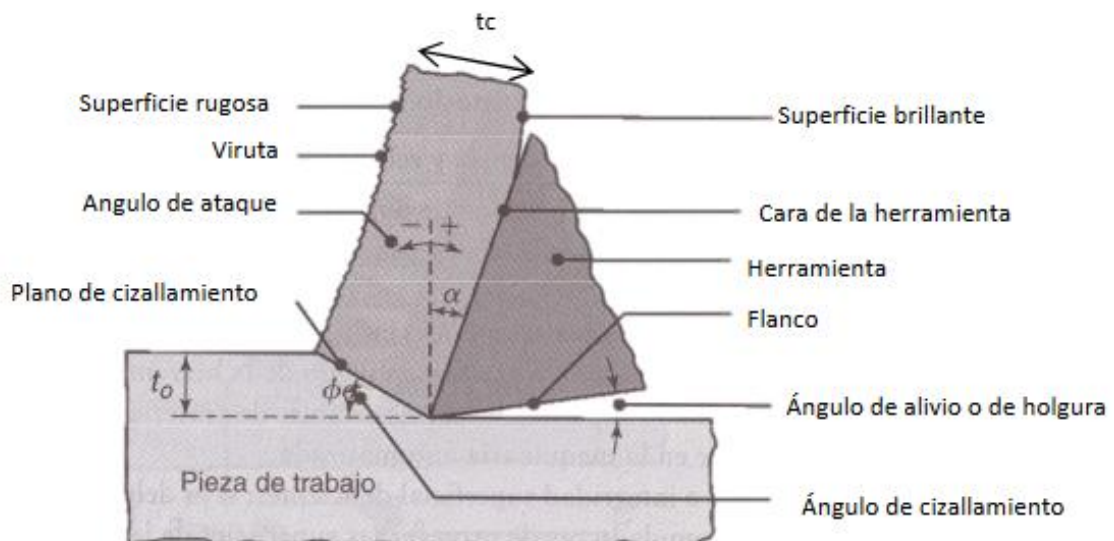


Figura 16. Esquema de un proceso de corte bidimensional (corte ortogonal) [22].

1. Virutas continuas

Con materiales dúctiles, altas velocidades de corte y/o ángulos de desprendimiento elevados, se forma una viruta continua. La deformación se produce en el plano de cizalladura, en la zona primaria de corte. Al ser una viruta continua, puede presentar, debido a la fricción, una zona secundaria de corte en la interfase entre herramienta y viruta, que es más gruesa cuanto mayor es la fricción. El acabado superficial por lo general es bueno, aunque no siempre las virutas continuas presentan ventajas, ya que se pueden enredar en el portaherramientas, los soportes y la pieza, o en los sistemas de eliminación, y es necesario parar el sistema para quitarlas. Para

solucionar este problema se usa el rompevirutas, y se cambian los parámetros de corte como son la velocidad de corte, el avance y el fluido de corte.

2. *Viruta de borde acumulado o recrecido*

Cuando las capas del material maquinadas se acumulan gradualmente sobre la herramienta, forman una viruta de borde acumulado o recrecido. Si se agranda, la viruta se hace inestable y termina rompiéndose. De la viruta, una parte se deposita sobre la pieza de manera aleatoria y otra parte se arrastra por la superficie de la herramienta. Salvo si se trata de eliminarla, el proceso en el que se forma y se destruye la viruta se repite continuamente durante el proceso de corte. El borde acumulado puede cambiar la geometría del filo de corte, además de que aumenta su dureza debido a la acumulación de capas y al endurecimiento por trabajo. El borde delgado y estable es preferible ya que reduce el desgaste y protege la cara de ataque de la herramienta.

Al aumentar la velocidad de corte, disminuye el tamaño del borde acumulado, incluso puede que no se llegue a formar. Se puede reducir su formación de las siguientes maneras:

- a. Al disminuir la profundidad de corte.
- b. Aumentar el ángulo de desprendimiento.
- c. El uso de herramientas agudas.
- d. El uso de un buen fluido de corte.

Generalmente, existe más probabilidad de que se cree el borde de recrecido cuanto mayor sea la afinidad de los materiales de la herramienta y la pieza. Si el metal ha sido recocido, tiene más probabilidad de que se forme borde recrecido que uno trabajado en frío.

3. *Virutas escalonadas o segmentadas*

Las virutas escalonadas presentan zonas de alta y baja deformación por cortante y son semicontinuas, presentando un aspecto de diente de sierra. Este comportamiento es característico de los metales que presentan baja conductividad térmica y una resistencia que disminuye rápidamente con la temperatura.

4. *Virutas discontinuas*

Las virutas discontinuas son segmentos que se fijan entre sí, de manera firme o floja, y que se producen bajo las siguientes condiciones:

- a. Los materiales frágiles en la pieza que son incapaces de absorber grandes deformaciones cortantes que pueden aparecer durante el corte.
- b. Materiales que tienen inclusiones e impurezas duras.
- c. Con velocidades de corte muy bajas o muy altas.
- d. Grandes profundidades de corte.
- e. Ángulos de desprendimiento pequeños.
- f. Falta de eficacia en el fluido de corte.
- g. Baja rigidez de la máquina herramienta.

Las fuerzas varían de forma continua en el proceso de corte, debido a que la viruta se forma de manera discontinua. La rigidez que presenta el portaherramientas y los sujetadores de la pieza, además de la de la máquina herramienta, es importante cuando se forman virutas discontinuas, ya que si no, aparecen vibraciones y traqueteos. Esto tiene como consecuencia que el acabado superficial de la pieza no sea adecuado y no se alcancen las dimensiones finales requeridas, además de daños en la herramienta y el desgaste de la misma.

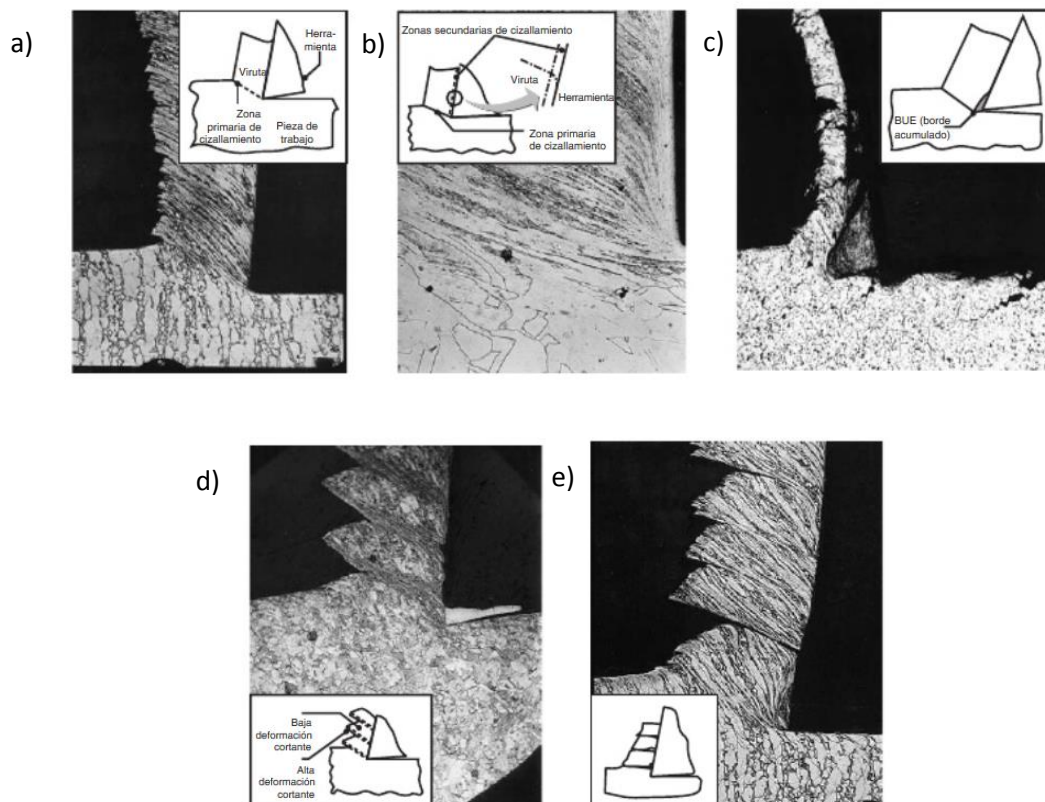


Figura 17. Tipos básicos de viruta y fotomicrografías correspondientes al corte de metales: (a) viruta continua con zona primaria angosta y recta; (b) zona secundaria de corte en la interfaz entre viruta y herramienta; (c) viruta continua con zona primaria de corte grande; (d) viruta segmentada o escalonada; (e) viruta discontinua [22].

Cuando se trabaja en procesos de corte con materiales metálicos y no metálicos, como plásticos o madera, las virutas se curvan al salir de la superficie de la pieza, aunque no se conocen los motivos. Aun así, existen varios factores que pueden influir directamente en esta curvatura:

- Distribución de los esfuerzos tanto en la zona primaria como secundaria de corte.
- Los efectos térmicos.
- Las características de endurecimiento por trabajo de la pieza.
- Geometría de la superficie de desprendimiento de la herramienta de corte.
- Variables del proceso y las propiedades del material.
- Los fluidos de corte y aditivos.

La viruta se enrosca más cuanto menor es la profundidad de corte, por lo que aumenta el ángulo de desprendimiento y se reduce la fricción entre la herramienta y la viruta.

Como se mencionó anteriormente, las virutas continuas y largas son peligrosas y es necesario parar el proceso de corte para apartarlas y evitar que se enreden. Esto es perjudicial cuando se emplean máquinas de alta velocidad y no se supervisan, por lo que para romper la viruta de manera intermitente, se hace uso del rompevirutas. Inicialmente se empleaba una placa de metal unida a la superficie de desprendimiento pero hoy en día las herramientas tienen incorporado en su diseño la capacidad del rompevirutas. Esto aumenta el ángulo efectivo de desprendimiento de la herramienta y, por lo tanto, aumenta el ángulo de plano cortante. En base a la experiencia, la viruta ideal tiene forma de 9 o “C” y cabe en un cuadrado de 25 mm [\[10\]](#).

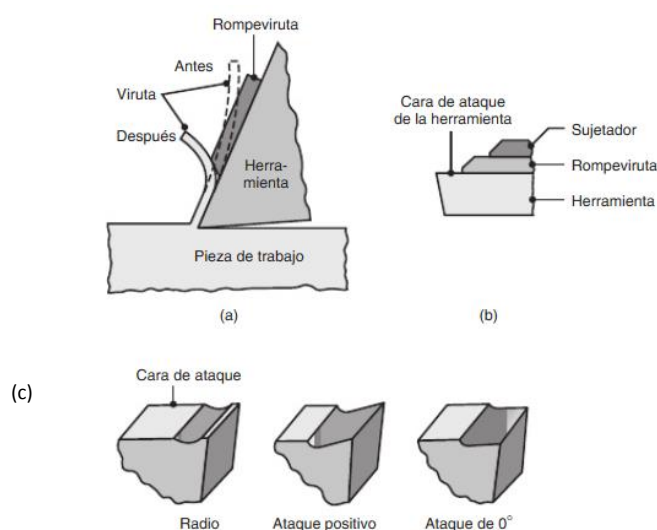


Figura 18. (a) Esquema de la acción de un rompevirutas; (b) Rompevirutas prensado o la cara de ataque de una herramienta de corte; (c) Surcos en las herramientas de corte, que funcionan como rompevirutas [\[22\]](#).

2.2.9 Ventajas y desventajas del proceso de arranque de material

Los procesos de arranque de material presentan varias ventajas frente a otros procesos existentes en la industria:

1. La precisión dimensional cerrada es mejor respecto a otros procesos como la fundición o el moldeo, que presentan peor acabado superficial.
2. Las piezas pueden presentar detalles geométricos internos y externos, planitudes, esquinas agudas que no se pueden realizar con procesos de formado y moldeo.
3. Para mejorar algunas propiedades como la resistencia al desgaste o la dureza, se aplican tratamientos térmicos, que pueden provocar un cambio de aspecto o distorsiones. Para resolverlo, después de tratamientos térmicos se realizan procesos de acabado para alcanzar las dimensiones finales requeridas.
4. Estos procesos pueden crear en la pieza características superficiales determinadas o algunas texturas, que no se consiguen con otros métodos.
5. Económicamente es preferible trabajar con este tipo de procesos, particularmente si es para una cantidad pequeña de piezas.

A la vez, estos procesos presentan ciertas limitaciones:

1. En estos procesos de arranque de viruta se produce desperdicio de material, lo que implica más energía, capital y mano de obra que los procesos de fundición y moldeo.
2. Pueden presentar efectos adversos en lo que se refiere a calidad superficial y a las propiedades del producto.
3. Para reducir el volumen de una pieza, es necesario más tiempo que otros procesos [\[10\]](#).

2.2.10 Herramientas para mecanizado

Las operaciones de corte del mecanizado se realizan en máquinas-herramientas, empleando herramientas de filo, además de elementos de sujeción. Las herramientas de corte deben soportar las fuerzas que se producen durante el mecanizado y deben presentar dureza y resistencia al desgaste. Los elementos de sujeción permiten fijar la herramienta y la pieza con la que se trabaja.

Al realizar un proceso de mecanizado, es necesario seleccionar la herramienta de corte correctamente. Para ello, hay que tener en cuenta dos factores fundamentales: el material y la geometría de la herramienta. Existen para ello herramientas enterizas y desmontables con una

plaquita. Según el tipo de proceso que se lleve a cabo, de la posición relativa entre el material de trabajo y la propia herramienta, las condiciones de avance y velocidad de corte, la herramienta deberá tener una geometría determinada.

Respecto a los dos factores anteriormente mencionados, las cualidades que puede adquirir la herramienta para que el proceso de mecanizado se realice de manera eficiente y económica, deben ser:

- *Dureza*: Durante el proceso de mecanizado, la superficie de la herramienta no puede sufrir deformaciones plásticas, además de que las deformaciones elásticas deben ser mínimas. Para ello, el límite elástico, además de la capacidad de carga de la herramienta, deben tener valores altos para poder aguantar las presiones a las que se somete durante la operación de corte.
- *Resistencia al desgaste*: el acabado superficial de la herramienta debe ser el adecuado para soportar la fricción, adhesión, corrosión y abrasión que pueden aparecer debido a la presión de trabajo a la que está sometida la herramienta, además de a la dureza del material de trabajo. En el proceso de corte, la velocidad de corte juega un papel importante en el desgaste de la herramienta.
- *Afilado*: la geometría de la herramienta es muy importante para que el proceso de corte se realice de manera adecuada y no se produzca la deformación del material de la pieza. Por tanto, dependiendo del material con el que se va a operar, se utiliza un ángulo de filo u otro. Para materiales dúctiles, la herramienta debe ser lo más afilada posible, mientras que para materiales duros es preferible que el ángulo del filo de la herramienta sea lo más amplio posible.
- *Tenacidad*: el material de la herramienta debe presentar un límite a rotura y a fatiga adecuado para poder soportar las condiciones a las que está sometida durante el mecanizado. Con una buena tenacidad se evita la rotura de la herramienta.
- *Capacidad de eliminación de viruta*: durante el mecanizado de materiales dúctiles, es imprescindible la eliminación de la viruta, por lo que la geometría de la herramienta debe estar diseñada para ello. Para separar la viruta durante el mecanizado se necesita mucha potencia. En este sentido, se han ido creando herramientas muy eficientes.
- *Gran resistencia a la rotura por flexión y a la compresión y conservación de dureza en frío y a altas temperaturas*: al realizar el proceso mediante arranque de viruta, se

produce calor, por lo que la herramienta debe mantener la dureza al incrementarse la temperatura.

- *Conductividad térmica adecuada:* esta propiedad es importante debido a que pueden producirse tensiones internas y provocar la rotura de la herramienta. Un buen coeficiente de conductividad provoca una rápida evacuación de calor.
- *Reducción del coeficiente de fricción:* el rozamiento entre la herramienta y la pieza genera calor, lo que puede deteriorar la herramienta.
- *Estabilidad química.*

Además del material base de la herramienta, se pueden analizar los recubrimientos empleados y cómo influyen en las propiedades que adquieren. Estos recubrimientos han supuesto un avance en los procesos de mecanizado, en particular en las plaquitas intercambiables. No solucionan los problemas de rotura que puede presentar el material base, aunque han mejorado las propiedades del material de la herramienta: presentan mayor dureza, mejorando el desgaste contra fricción y abrasión; reducen el rozamiento superficial, lo que permite operar con esfuerzos, presiones y, en consecuencia, gradientes de temperatura menores [\[17\]](#), [\[20\]](#).

2.2.11 El calor en la formación de viruta

En el proceso de corte del material, la energía mecánica es transformada en trabajo de deformación de cizallamiento para que se genere la viruta, en energía para que la viruta se mueva por la capa de desprendimiento de la herramienta y contra el rompevirutas y, finalmente, en forma de calor.

Al crearse la viruta, se genera calor y se pueden distinguir tres zonas diferenciadas:

1. *Zona de cizalladura primaria:* Esta zona está situada delante del filo de la herramienta, con una orientación de ϕ sobre la superficie que se va a mecanizar. Es en esta zona donde se produce el cizallamiento del material, formándose la viruta que se desliza por la superficie de desprendimiento de la herramienta. Al deformarse el material en la zona primaria, se produce una energía de deformación que se transforma en calor.
2. *Zona de cizalladura secundaria:* se encuentra en la zona de contacto entre la viruta y la superficie de desprendimiento de la herramienta. Es en esta zona donde se produce fricción entre la pieza y la herramienta, ya que se alcanza una presión y una temperatura

elevadas. En consecuencia, el material se deforma en planos paralelos a la dirección de salida de la viruta.

3. *Zona de cizalladura terciaria*: es en esta zona donde se produce una deformación de la superficie de la pieza, similar a la laminación. Debido al aplastamiento, la rugosidad superficial disminuye con respecto a la teórica, y puede crear tensiones residuales en la superficie mecanizada.

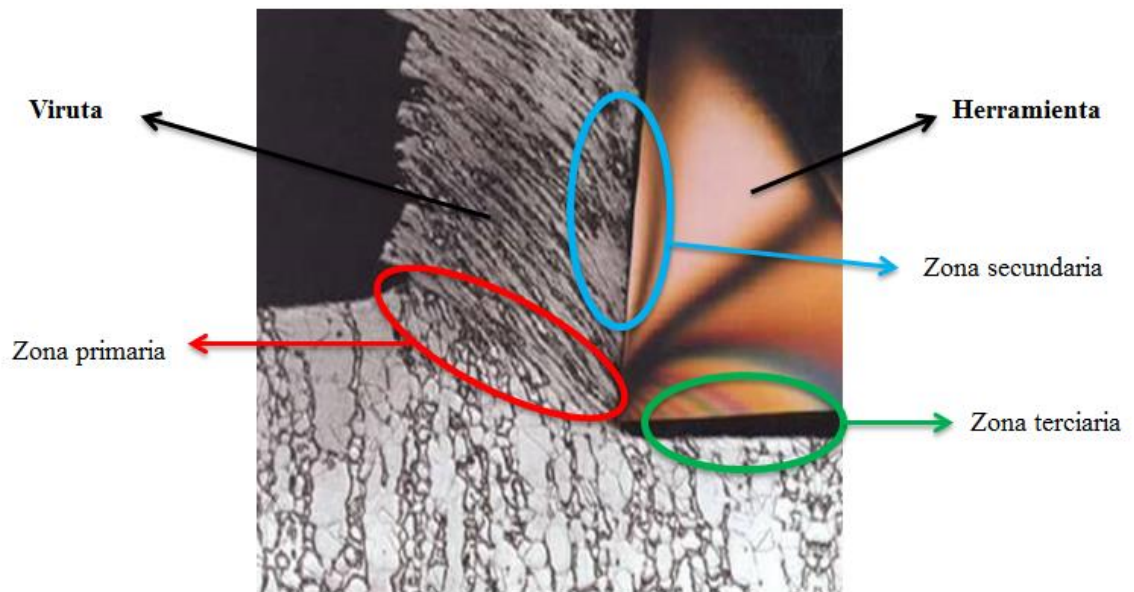


Figura 19. Zonas de generación de calor en el corte [23].

Para hacer frente al problema del calentamiento, se suelen utilizar velocidades de corte moderadas o refrigerar la pieza con líquidos refrigerantes o lubricantes, como aceites de corte o taladrina (emulsión de aceite, 5-10%, en agua) [21].

Este aumento de temperatura durante la operación de corte provoca que el material se reblandezca e influye en el rendimiento óptimo de la herramienta y en la calidad de la superficie del material a mecanizar. Dependiendo de la velocidad de corte y del material con el que se va a trabajar, la cantidad de calor que se genera varía. En menor medida, el avance también influye en la cantidad de calor que se genera. Se representa gráficamente en la figura 20 la dependencia de la temperatura con las dos magnitudes de corte: la velocidad de corte y el avance.

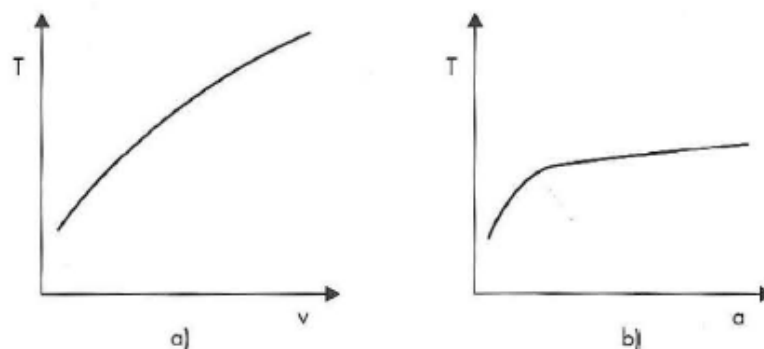


Figura 20. Variación de la temperatura en función de: a) Velocidad de corte; b) Avance [17].

Para soportar las altas temperaturas que se producen en las operaciones de corte, los materiales de las herramientas han evolucionado en este sentido. Por ejemplo, los aceros rápidos mecanizan a la mitad de temperatura que los metales duros, ya que estos últimos presentan propiedades adecuadas para soportar elevadas temperaturas. El conocer cómo se distribuye el calor en la cara de desprendimiento, es un factor importante para desarrollar la geometría de corte. La temperatura, por tanto, en la zona de corte depende de:

1. El contacto entre la herramienta y la viruta que se genera.
2. La magnitud de las fuerzas de corte.
3. El tipo de fricción entre la pieza y el material de la herramienta.

Al combinar las magnitudes de velocidad de corte y profundidad se generan temperaturas que favorecen la aparición del filo recrecido. Para ello, se han creado herramientas especiales de corte capaces de trabajar a temperaturas superiores a las necesarias para que se forme el filo recrecido. En estas condiciones, la viruta extrae parte del calor, actuando como un refrigerante en la evacuación dicho calor. En este contexto, a velocidades altas se puede reducir el calor que fluye hacia la pieza y así disminuir la temperatura que se produce en la operación de corte. Si se trabaja, por lo tanto, a temperaturas bajas, la vida de la herramienta se alarga y, en consecuencia, la deformación de la pieza de trabajo es menor [17].

El calor que no se disipa al ambiente y al fluido de corte si existe, se evacua.

- Por la viruta
- Por la herramienta
- Por la pieza

El porcentaje de calor disipado en cada uno de ellos depende de la velocidad de corte (*figura 21*).

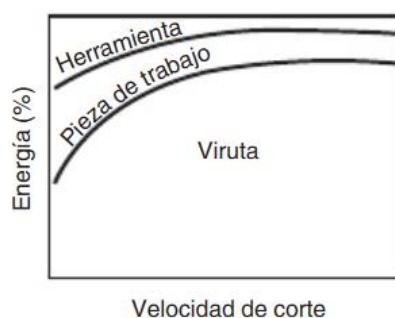


Figura 21. Distribución típica de la energía total de corte entre herramienta, la pieza de trabajo y la viruta en función de la velocidad de corte [22].

Al aumentar la velocidad de corte, se eleva la temperatura debido al calor generado. Así, a medida que se aumenta la velocidad de corte, la cantidad de energía disipada por la pieza y herramienta es menor, aumentando por lo tanto el calor que se disipa por la viruta. Debido a esto, el calor afecta mínimamente a la herramienta y al acabado y a la calidad de la herramienta. Para disminuir las temperaturas que se producen en la herramienta, se puede aumentar la sección de la herramienta y refrigerar de manera adecuada [20].

2.3 Método de elementos finitos

A día de hoy el método de elementos finitos (MEF) se emplea ampliamente en la industria y siguen apareciendo numerosos trabajos de investigaciones en este sector. Además, los ordenadores suponen un medio muy eficaz para la resolución de las ecuaciones que se plantean en este método. En la actualidad, numerosos problemas con gran importancia práctica aparecen en el campo de la ingeniería. Estos presentan una complejidad matemática que, aunque las ecuaciones no resultan difíciles de deducir y además se introducen hipótesis que simplifican el problema, su solución por métodos de análisis exactos solo se consigue para determinadas geometrías, sistema de cargas y condiciones de contorno. A pesar de que esta solución exacta es la que más información aporta sobre el comportamiento que adquieren las variables que están involucradas en el problema, es preferible emplear métodos numéricos que analicen y diseñen con un alto grado de precisión. Por lo tanto, aunque el empleo del método de elementos finitos permite reducir los costes y el tiempo que traen consigo los ensayos experimentales, la falta de exactitud de los resultados hace que se siga necesitando emplear prototipos, aunque en un número inferior que anteriormente.

Los métodos de elementos finitos son algunos de todos los métodos numéricos que se han desarrollado y empleado en muchos problemas del área de la ciencia con mucho éxito. Aun así, es importante tener en cuenta que esta es una herramienta de análisis muy poderosa pero, sin embargo, permite obtener soluciones aproximadas de problemas de mecánica en el continuo, por lo que hay que utilizarlo de manera correcta. Estos permiten reproducir el comportamiento de estructuras complejas con ecuaciones constitutivas no lineales, además de realizar estudios preliminares, antes de la realización experimental, que analicen el problema y los parámetros que lo gobiernan. El empleo de un modelo numérico que tenga en cuenta las variables del problema es el único medio para realizar dicho estudio preliminar.

Este modelo numérico posibilita que, a posteriori, se puedan comparar los resultados obtenidos a partir de dicho modelo y los resultados experimentales, validarlo y obtener los valores de otros resultados de interés que no se han medido experimentalmente.

Este método presenta una idea general que consiste en dividir el elemento físico continuo en un conjunto finito de elementos interconectados entre sí a través de unos puntos denominados nodos. Las mismas ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo, rigen también el del elemento. De esta manera se consigue simplificar el problema, pasando de un sistema continuo con infinitos grados de libertad y regido por una ecuación o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número limitado de grados de libertad, con un comportamiento gobernado por un sistema de ecuaciones lineales o no. Se supone que el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento se expresa en función de los desplazamientos de sus nodos. Así, se obtendrán las incógnitas del problema que son el movimiento de dichos nodos y, a partir de ellos, se pueden determinar las tensiones y deformaciones en el interior del elemento.

El conjunto de los nodos generan una malla y sobre ellos se realizan los cálculos. Por lo tanto, la construcción de esta malla debe ser el primer paso antes de realizar cualquier simulación. Una vez generada, se imponen diferentes condiciones de contorno en el proceso y se puede modificar el mallado en ciertas zonas en las que se necesite un conocimiento más preciso [\[24\]](#),[\[25\]](#).

Al emplear el método de elementos finitos para resolver un problema, el proceso se puede dividir en tres etapas:

- Pre-proceso: es la etapa inicial en la que se definen la geometría, las condiciones de contorno, las propiedades de los materiales, las cargas que se aplican y se genera la malla. Esta última parte es la más importante ya que de ella dependen la calidad de los resultados.
- Proceso: en esta etapa se resuelve el problema que se ha descrito en el pre-proceso y genera las soluciones.
- Post-proceso: en esta etapa se pueden visualizar los resultados que se han obtenidos en el cálculo, que quedan representados en gráficos.

Este proyecto se ha resuelto mediante el método de elementos finitos utilizando el software ABAQUS/*Explicit*, ya que es el más apropiado para realizar análisis dinámicos como el de este trabajo. El proceso seguido para obtener los resultados es el siguiente:

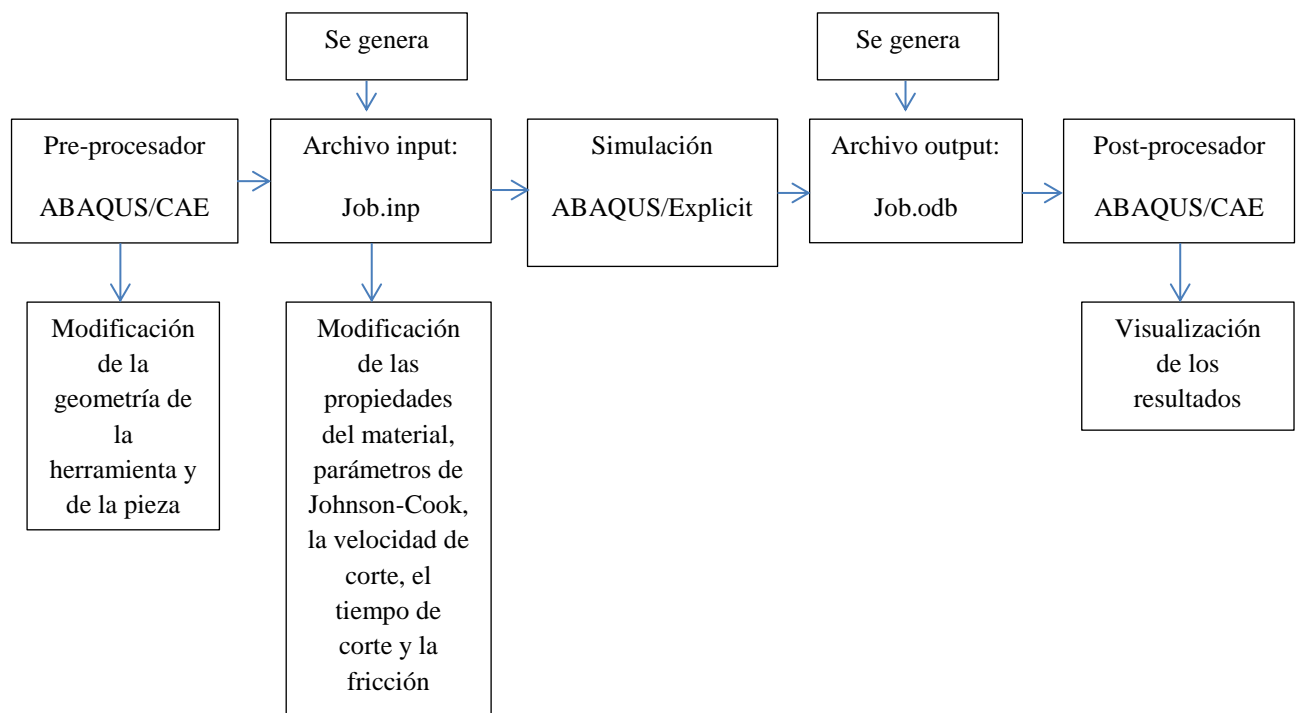


Figura 22. Esquema seguido con el programa ABAQUS/*Explicit*.

CAPÍTULO III

3. Estudio experimental

El objetivo de este capítulo es reunir toda la información de las principales investigaciones que han sido publicadas sobre el mecanizado ortogonal del acero AISI 1050, anteriormente a la realización de este proyecto. Además, se recopilan los datos experimentales con la finalidad de compararlos con los resultados obtenidos del modelo numérico, y con ello proceder a validar dicho modelo.

3.1 Mecanizado en corte ortogonal del acero

Como se ha comentado previamente, el proceso de maquinado consiste en obtener geometrías y dimensiones determinadas en piezas que serían muy difíciles de conseguir con otras técnicas. Es por ello que se debe tener en cuenta la maquinabilidad del material, que es una propiedad que permite determinar si este se mecaniza por arranque de viruta con facilidad o no. Además, en el proceso de maquinado también es importante la herramienta escogida para que el trabajo se realice correctamente, así como el fluido de corte que reduce el rozamiento entre la herramienta y la pieza y facilita el movimiento relativo entre ambas.

Los materiales que se mecanizan mejor requieren fuerzas de corte y potencias bajas, los filos de la herramienta de corte se desgastan lentamente y las superficies obtenidas son menos rugosas. Debe existir un equilibrio entre la resistencia de los materiales, que debe ser alta para soportar las altas tensiones a las que está sometida, y la maquinabilidad que presenta el material, para que la operación sea económica. En el caso de los aceros y en particular el acero AISI 1050 presenta buena maquinabilidad. A pesar de ello, no se cuenta con muchos datos experimentales con los que poder comparar los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas que se han lanzado en el proyecto.

Con la finalidad de analizar el comportamiento del material en un proceso de conformación por arranque de viruta en corte ortogonal, se han empleado modelos numéricos que proporcionan información sobre parámetros que son difíciles de medir durante los ensayos. Los resultados que se obtienen de las simulaciones del proceso de corte ortogonal, basados en el método de elementos finitos, son muy utilizados en la actualidad, aunque son aproximados y dependen de variables como la geometría de la pieza y de la herramienta, las propiedades, el tamaño de malla, los parámetros de corte,...

El estudio de la morfología de viruta y la longitud de contacto consiste en comprobar cómo influyen en dichos resultados los parámetros como la velocidad de corte, el avance y el coeficiente de fricción en la interfaz viruta-herramienta, ya que no existen datos experimentales de estos con los que comparar.

En el caso de las fuerzas de corte y de avance, sí se encuentran datos experimentales en la literatura. Aunque el corte oblicuo es el más empleado en los procesos de mecanizado, tanto los datos de los ensayos que se encuentran en la bibliografía como los obtenidos de las simulaciones numéricas, se simplifican a corte ortogonal.

3.2 Fuerzas de corte y de avance experimentales

Las fuerzas de corte y de avance son objeto de estudio ya que, a partir de los datos experimentales, se puede realizar la comparación con los resultados obtenidos de las simulaciones y se puede proceder a la validación del modelo numérico, que es uno de los objetivos principales del proyecto.

En el caso de la herramienta que se ha empleado en los ensayos, se trata de una de carburo recubierta de nitruro de titanio aluminio (TiAlN). Su geometría se muestra en la *figura 23*.

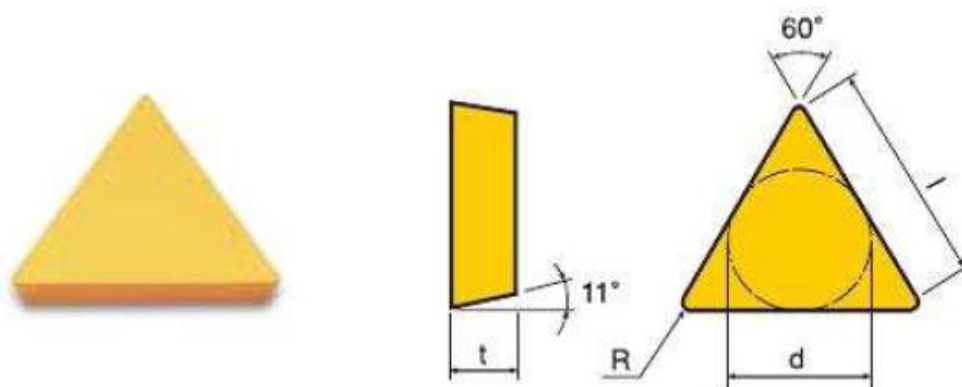


Figura 23. Herramienta de plaquita empleada en los ensayos [27].

Los valores experimentales de las fuerzas de corte y de avance se han obtenido para cada velocidad de corte y para cada avance y quedan recogidos en la *tabla 7*.

Velocidad de corte	Ángulo de desprendimiento	Avance	Fuerza experimental de corte	Fuerza experimental de avance	Coefficiente de fricción
V_{corte} (m/min)	α (°)	a (mm)	F_c (N)	F_a (N)	μ
75	5	0.12	483	278	0.70
75	5	0.16	656	383	0.71
150	5	0.12	445	215	0.59
150	5	0.16	592	263	0.55
220	5	0.12	431	195	0.56
220	5	0.16	561	215	0.49
300	5	0.12	445	160	0.46
300	5	0.16	581	194	0.43
425	5	0.12	428	183	0.40
425	5	0.16	543	180	0.40
600	5	0.12	384	90	0.33
600	5	0.16	512	119	0.33

Tabla 7. Resultado de las fuerzas de corte y avance experimentales (Fuente: [27]).

A partir de los datos experimentales de las fuerzas de corte y de avance que se obtuvieron de los ensayos y el ángulo de desprendimiento de la herramienta, se calculó el coeficiente de fricción con la siguiente expresión:

$$\mu = \frac{F_a + F_c \cdot \tan \alpha}{F_c - F_a \cdot \tan \alpha}$$

siendo:

F_a : fuerza de avance

F_c : fuerza de corte

α : ángulo de desprendimiento

Esta expresión indica que el coeficiente de fricción depende de la velocidad de corte, ya que de esta dependen las fuerzas de corte y de avance. Por lo tanto, para cada velocidad de corte existe un coeficiente de fricción, valor que se introduce en los archivos .INP a la hora de realizar las simulaciones numéricas.

Los valores de las fuerzas de corte y de avance se han representado en dos gráficas, cada una con un avance diferente. La *figura 24* representa un avance de 0.12 mm y la *figura 25*, un avance de 0.16 mm.

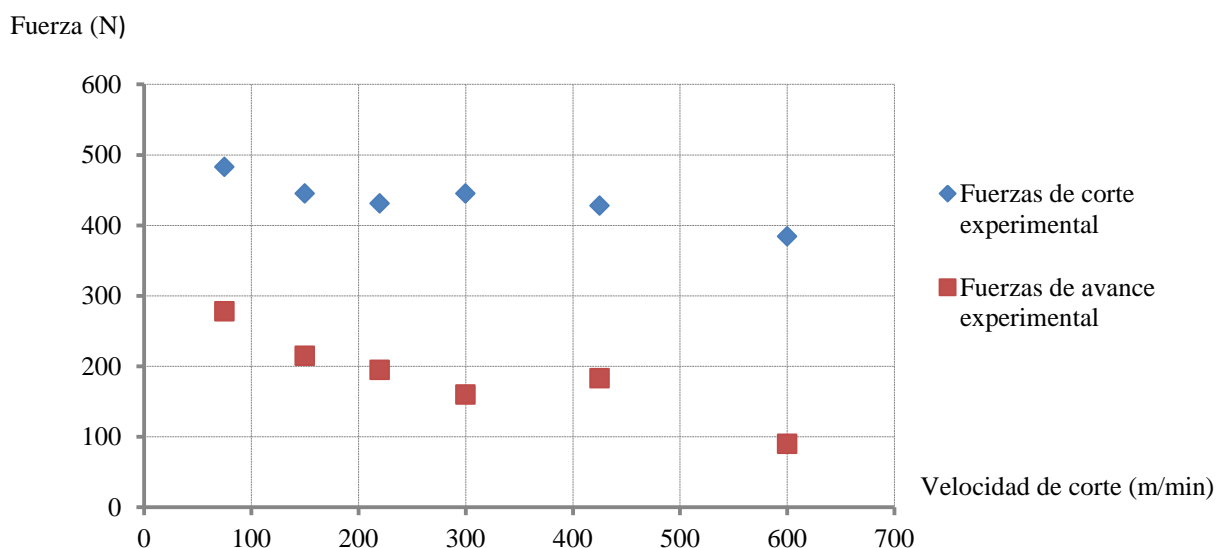


Figura 24. Fuerzas experimentales de corte y avance para un valor de avance 0.12 mm.

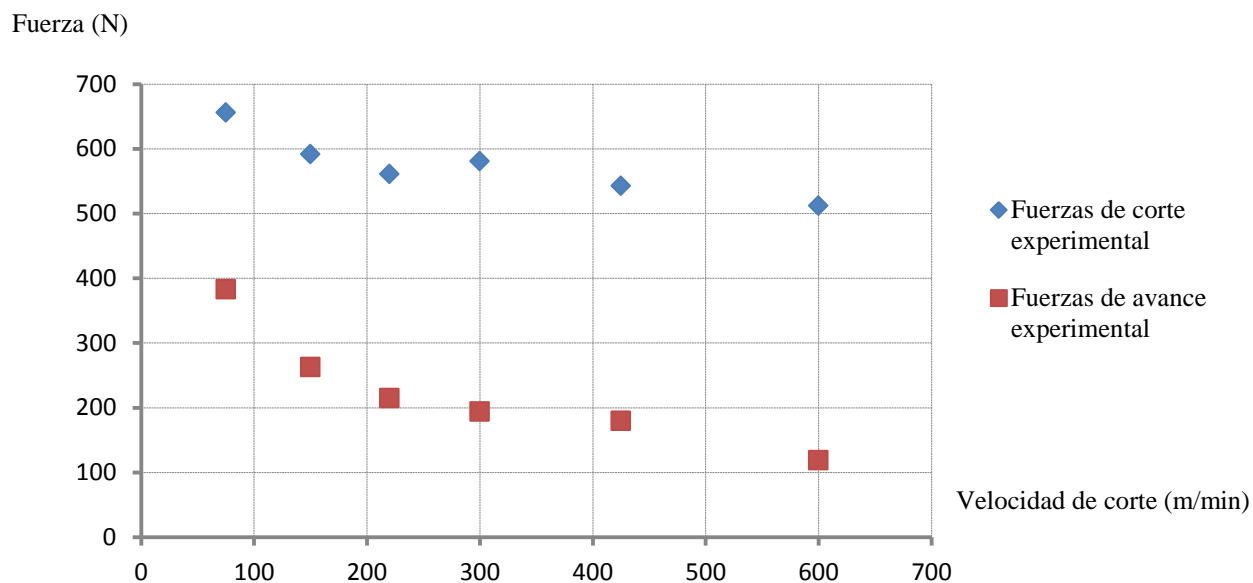


Figura 25. Fuerzas experimentales de corte y avance para un valor de avance 0.16 mm.

A partir de las *figuras 24 y 25* se puede observar que a velocidades bajas, las fuerzas de corte descienden de manera progresiva y a medida que aumenta la velocidad, las fuerzas tienden a estabilizarse y obtener un valor constante. De la misma manera ocurre con la tendencia de las fuerzas de avance, aunque los valores que estas alcanzan son menores que las fuerzas de corte. Por lo tanto, a medida que la velocidad de corte aumenta, las fuerzas disminuyen hasta alcanzar un valor constante. Si se comparan ambas gráficas, se puede observar que el aumento de avance de 0.12 mm a 0.16 mm, conlleva un aumento de las fuerzas de corte y de avance.

Estos datos experimentales se emplean para realizar una comparación con los resultados de las simulaciones numéricas y validar el modelo numérico empleado. En el *Capítulo V*, se compararán los ensayos realizados con una herramienta con un ángulo de desprendimiento de 5° constante y un avance de 0.12 y 0.16 mm. Como se ha comentado anteriormente, el valor del coeficiente de fricción se obtiene a partir de los datos experimentales y se introduce en las simulaciones para poder realizar la comparación correctamente.

CAPÍTULO IV

4. Modelo numérico

En este capítulo se introduce el método de cálculo empleado para la resolución de las simulaciones numéricas, las cuales se han realizado manteniendo unos parámetros invariables en todas ellas y modificando otros, con la finalidad de analizar su efecto en los resultados obtenidos. Además, se especifica el modelo numérico que se ha utilizado con todas sus características y se describirá la ley de comportamiento del material a estudiar. Por último se describen las simulaciones numéricas que se han llevado a cabo.

4.1 Características básicas del modelo numérico

Con el *software* ABAQUS/Explicit se ha realizado un modelo de deformación plana, es decir, un modelo bidimensional, empleando la formulación lagrangiana. Hay que tener en cuenta que se trata de un proceso de mecanizado por corte ortogonal. Consta de dos elementos principales: la pieza con la que se trabaja y la herramienta de corte empleada. La geometría y dimensiones están definidas en la *figura 26*. Como se observa, a la herramienta se le aplica la velocidad de corte.

La información del modelo se recoge en archivos .INP, en los cuales quedan definidos todos los parámetros. Entre ellos, se encuentran las propiedades del material, la geometría y dimensiones del modelo, los parámetros de corte, los tiempos de corte y los parámetros de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook. Se crean los archivos .INP, cada uno con sus correspondientes condiciones de corte, y se cargan en el programa para lanzar las diferentes simulaciones.

En el proyecto, se han realizado modificaciones a partir de un modelo numérico que ha sido facilitado previamente en un archivo .CAE. Su diseño no es parte del desarrollo de este proyecto, pero se ha trabajado a partir de ese modelo original.

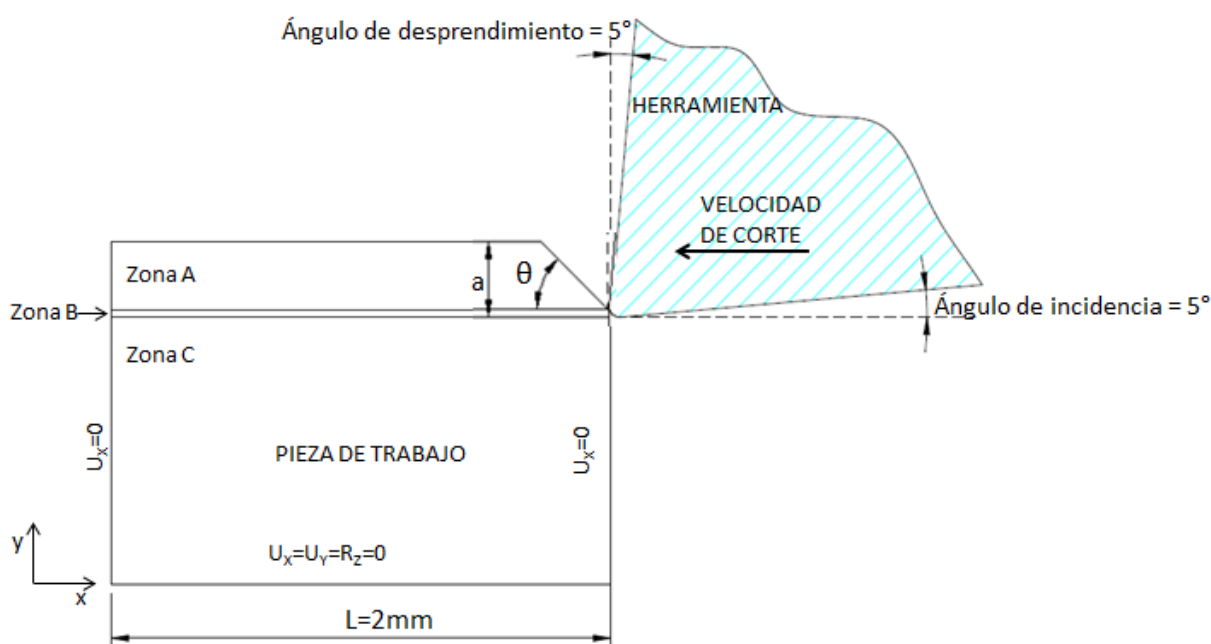


Figura 26. Modelo numérico empleado.

4.2 Mallado

Como se indica en el anterior apartado, en el modelo numérico a estudiar, a la herramienta se le aplica la velocidad de corte y se mecaniza bajo condiciones de tensión plana. Se ha discretizado la malla mediante una estructura de elementos CPE4RT, donde cada variable tiene un significado:

C: el elemento es cuadrado.

PE: se supone una deformación plana.

4: cada cuatro elementos existe un nodo.

R: tiene una interpolación en el centro del elemento.

T: utiliza la temperatura como variable.

La malla de la pieza a trabajar está dividida en tres zonas, como se observa en la *figura 26*.

- La zona A (viruta) es la parte del material que se convierte en viruta tras el mecanizado y tiene un espesor que corresponde con el avance que, como se indica más adelante, es un parámetro que se modificará en las simulaciones, siendo inicialmente de valor 0.10 mm y después de 0.12 y de 0.16 mm.
- La zona B (interfase viruta-pieza) es la parte intermedia que tiene un espesor de 4 μm .
- La zona C (base) es la parte del material que presenta la superficie mecanizada y tiene un espesor de 0.10 mm.

El tamaño de los elementos es de 10 μm en las zonas A y C, mientras que en la zona B es de 4 μm . Este tamaño de elemento ofrece una buena combinación entre el tiempo de cálculo y la precisión de los resultados obtenidos. Se dispone de un estudio previo de convergencia de malla para un modelo numérico similar con valores de avance próximos a los del presente trabajo, por lo que se considera que el tamaño de malla para las condiciones expuestas es válido [\[26\]](#).

Se ha empleado un ordenador básico con el *software* ABAQUS/Explicit y no se ha lanzado más de una simulación a la vez. Esto provoca mucho tiempo de cálculo, teniendo en cuenta que en algún caso se ha tenido que repetir la simulación, ya que se ha abortado la operación por falta de información en algún archivo .INP. Cabe destacar que el tiempo de cálculo ha

dependido en mayor medida de la velocidad de corte frente al resto de parámetros como el avance o el coeficiente de fricción, obteniendo tiempos de cálculo de entre 6 y 7 horas para las velocidades más bajas (75 m/min y 150 m/min) y entre 1 y 2 horas para las velocidades más altas (425 m/min y 600 m/min). Por lo tanto, el tamaño de la malla escogido y basado en modelos numéricos anteriores es adecuado para que los tiempos de cálculo no sean excesivamente elevados.

En la *figura 27*, se observa que el mallado de las zonas B y C se realiza mediante rectas paralelas a la horizontal y a la vertical. Sin embargo, la zona de la viruta presenta un mallado con rectas que tienen una inclinación θ , de 45° , respecto a la dirección horizontal. Esta es la orientación preferencial para que la malla siga el plan de cizallado y facilite la formación de viruta.

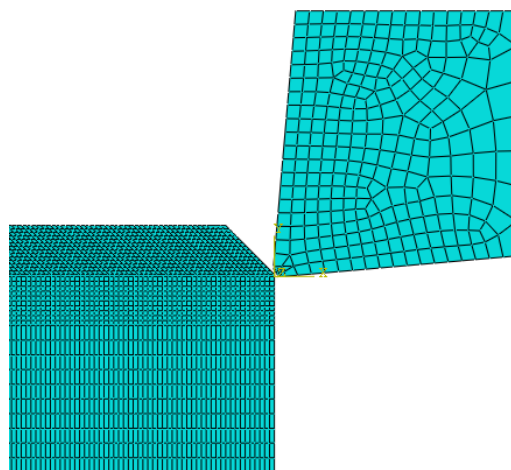


Figura 27. Mallado del modelo numérico.

Cabe destacar que en el modelo numérico del proyecto se ha establecido un criterio de rotura con la finalidad de quitar los elementos distorsionados, de manera que cuando se alcanza un valor crítico de deformación de cizalladura ϵ_p^{crit} , se elimina el elemento. La viruta se forma a partir de esos elementos que fallan. El valor de esa máxima deformación varía dependiendo de la zona en la que se encuentre. En el modelo numérico a estudiar, se ha supuesto que el valor de deformación crítica en la zona de la viruta es de 6, en la zona intermedia y en la base, el valor es de 3. Este criterio permite la realización de simulaciones de corte ortogonal evitando que se produzcan excesivas distorsiones de la malla, lo que conllevaría una detención del cálculo.

Al analizar por el método de elementos finitos se requiere que se aseguren unos resultados muy próximos a los reales, por lo que es muy importante el mallado. Por ello, uno de los mayores

problemas para definirlo está en encontrar un equilibrio entre el número de elementos y, en consecuencia, su tamaño, y el tiempo de cómputo, ya que a medida que el tamaño de cada elemento disminuye, se encuentran mejores resultados, pero aumenta el tiempo de cálculo.

4.3 Ángulos de la herramienta y geometría de corte

Los ángulos de la herramienta de corte y la geometría de la pieza en general se presentan en la *figura 28*. En primer lugar, la herramienta presenta un ángulo de desprendimiento y un ángulo de incidencia, ambos con un valor de 5° . En todas las simulaciones que se realizan en el proyecto, estos ángulos son constantes. Además, la herramienta presenta un radio de punta de 0.02 mm. El valor del avance inicialmente es de 0.10 mm, y se modifica posteriormente a 0.12 mm y a 0.16 mm para realizar las comparaciones con los datos experimentales de la literatura y analizar la influencia del avance sobre los resultados.

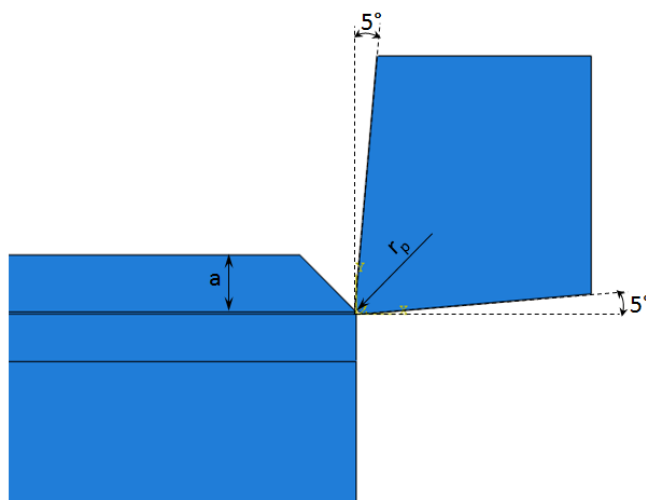


Figura 28. Ángulos de la herramienta y geometría de corte.

4.4 Parámetros de corte

En este apartado se explican, no solo los parámetros de corte que se han mantenido fijos y los que se han modificado para analizar los resultados, sino también las condiciones de contorno que se han empleado a la hora de realizar el modelo numérico. En referencia a estas últimas, cabe destacar que en la zona correspondiente a la base de la pieza, se restringen los movimientos horizontal y vertical, y se anulan las reacciones en la dirección x . Además, el desplazamiento horizontal es nulo en los laterales, mientras que la superficie superior de la base está libre. La zona de la viruta, que es la parte del material que se arranca durante el mecanizado, se mueve libremente por lo que no existe ninguna restricción en su movimiento.

La herramienta sufre muchos esfuerzos durante el mecanizado, por lo que se considera un elemento rígido para que no se deforme.

En el modelo numérico a estudiar, se han introducido unos valores característicos que han ido variando en cada simulación para comprobar su influencia sobre otras variables. Entre ellos, se encuentran:

1. *Velocidad de corte*: en todas las simulaciones, la herramienta mecaniza la pieza con una velocidad en la dirección x y esta será negativa, ya que se mueve en sentido contrario a la dirección x establecida en el sistema de referencia. Los valores utilizados en las simulaciones de corte son: 1.25 m/s (75 m/min), 2.5 m/s (150 m/min), 3.67 m/s (220 m/min), 5 m/s (300 m/min), 7.083 m/s (425 m/min) y 10 m/s (600 m/min). De esta manera, se estudia la influencia en los resultados, del aumento progresivo de la velocidad de corte.
2. *Tiempo de corte*: este parámetro depende directamente de la velocidad de corte que se emplea en la simulación y de la distancia que se mecaniza. En este caso, la longitud de la pieza es de 2 mm y es un valor constante para todas las simulaciones. Dependiendo de la velocidad de corte escogida, el tiempo de mecanizado varía según la siguiente expresión:

$$t_{corte} = \frac{0.002 \text{ m}}{V_{corte} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)} [\text{s}]$$

De esta manera, para las velocidades de 1.25 m/s (75 m/min), 2.5 m/s (150 m/min), 3.67 m/s (220 m/min), 5 m/s (300 m/min), 7.083 m/s (425 m/min) y 10 m/s (600 m/min), los tiempos de corte serán: 0.0016 s, 0.0008 s, 0.000545 s, 0.0004 s, 0.000282 s y 0.0002 s, respectivamente.

3. *Coefficiente de fricción*: inicialmente se establece un valor constante del coeficiente de fricción entre la viruta y la superficie de la herramienta de $\mu=0.5$, variando el resto de parámetros anteriormente mencionados. Para realizar la comparación de los resultados experimentales de la literatura con los obtenidos numéricamente, el coeficiente de fricción debe variar con cada velocidad de corte, es decir, $\mu=f(V_c)$.

4.5 Ecuación constitutiva del material de la pieza

El material de la pieza que se emplea en el modelo numérico de este proyecto se considera homogéneo, es decir, todas las propiedades mecánicas son iguales en todos los puntos del sólido. Además se supone un material termoviscoplastico.

El comportamiento del material a estudiar se rige por la ley de Johnson-Cook. En el *software* ABAQUS/*Explicit* empleado para la realización de las simulaciones numéricas de corte ortogonal, la ecuación de Johnson-Cook está definida e implementada.

Este es el modelo constitutivo más empleado entre los códigos de simulación numérica por elementos finitos. Se utiliza principalmente en los problemas en los que el material se somete a altas velocidades de deformación: mecanizado, conformado rápido,... Esta ecuación es una expresión empírica que relaciona la tensión efectiva de Von Mises σ , con la deformación ε .

$$\sigma = [A + B \cdot \varepsilon^n] \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_f - T_{ref}} \right)^m \right]$$

siendo:

A: el límite elástico.

B, n: el coeficiente y el exponente de endurecimiento por deformación, respectivamente.

C, m: la sensibilidad del material a la velocidad de deformación y a la temperatura, respectivamente..

T , T_{ref} :: la temperatura y la temperatura de referencia (293 K).

T_f : la temperatura de fusión (en el acero AISI 1050, es 1783 K).

ε : la deformación plástica equivalente.

$\dot{\varepsilon}$: la velocidad de la deformación.

$\dot{\varepsilon}_{ref}$: la velocidad de deformación equivalente (10^{-3} s^{-1}).

Los valores de estos parámetros del modelo están disponibles en la bibliografía científica. Se han obtenido experimentalmente los parámetros de la ley de comportamiento de Johnson-Cook

para el acero AISI 1045 sin tratar térmicamente. Estas constantes se utilizarán también para el acero AISI 1050, ya que presentan características químicas parecidas [27].

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
553.1	600.8	0.234	0.0134	1

Tabla 8. Parámetros de Johnson-Cook del acero AISI 1050 (Fuente: [27]).

La ecuación presenta tres términos que describen el comportamiento plástico que presenta el material en función de la deformación, la velocidad de la deformación y la temperatura. El primer término de la ecuación representa el endurecimiento por deformación; el segundo término corresponde con los efectos viscosos debido a la velocidad de la deformación $\dot{\epsilon}$; el último término corresponde al efecto de la temperatura.

Por otro lado, los materiales de la herramienta y de la pieza se mantienen constantes en todos los casos que se han estudiado y los valores de sus propiedades se muestran en la *tabla 9*. Como se explicará en el apartado 4.6 “Descripción de las simulaciones y estudio de los parámetros”, a partir del archivo .INP se modifica manualmente el valor de las propiedades de los materiales.

PROPIEDADES	PIEZA DE TRABAJO	HERRAMIENTA DE CORTE
MATERIAL	AISI 1050	Herramienta de Carburo recubierta de TiAlN
DENSIDAD [kg/m ³]	7850	12700
CONDUCTIVIDAD [W/m · K]	49.8	33.5
MÓDULO DE YOUNG [GPa]	210	500
COEFICIENTE DE POISSON []	0.3	0.3
COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA [1/K]	10 ⁻⁶	-
CALOR ESPECÍFICO [J/kg · K]	486	234

Tabla 9. Propiedades de la pieza y la herramienta de corte.

4.6 Descripción de las simulaciones y estudio de los parámetros

En el presente proyecto adquiere gran importancia el trabajo experimental y de análisis que se ha realizado mediante el programa ABAQUS/*Explicit* que trabaja con el método de elementos finitos (MEF).

Cabe destacar que este trabajo que implica las simulaciones numéricas se ha realizado de manera progresiva, es decir, no se han modificado todos los parámetros directamente hasta obtener las simulaciones a analizar, sino que se ha ido siguiendo un proceso.

Como se ha mencionado anteriormente, para la realización de esta parte numérica del proyecto se ha partido de un archivo .CAE con un modelo numérico original. A partir de este, se ha modificado el ángulo de desprendimiento de 0° a 5° ya que en el modelo original este ángulo no se correspondía con el definitivo. A partir de este archivo, se ha obtenido el archivo .INP y en él se han introducido las propiedades del material de la pieza y de la herramienta. A continuación, se ha creado un archivo .INP para cada velocidad de corte, modificando manualmente este parámetro con su correspondiente tiempo de corte. Estas configuraciones se lanzan para analizar su influencia en las fuerzas resultantes. Posteriormente, se modifica el avance en el archivo .CAE, que para las simulaciones anteriores es de 0.10 mm, y se crea, para cada velocidad de corte, un archivo .INP con un valor de avance de 0.12 mm y 0.16 mm. Así se observa cómo afecta en los resultados a estudiar, la variación del avance. Por último y, atendiendo al coeficiente de fricción que anteriormente ha permanecido con un valor constante de 0.5, se observa que en los datos experimentales, este valor depende de la velocidad de corte que presente la herramienta. Por lo tanto, para realizar una comparación con los resultados experimentales de la literatura, este dato debe adquirir el mismo valor que se calculó a partir de los ensayos. Como ya se ha comentado, el coeficiente de fricción se obtiene a partir de las fuerzas experimentales obtenidas y ese valor se introduce en los archivos .INP para lanzar las simulaciones numéricas. En la *tabla 10* se muestra el valor del coeficiente de fricción para cada velocidad de corte y avance.

AVANCE	0.12 mm	0.16 mm
VELOCIDAD DE CORTE	μ	μ
m/s	Fricción	Fricción
1.25	0.7	0.71
2.5	0.6	0.55
3.67	0.56	0.49
5	0.46	0.43
7.08	0.4	0.4
10	0.33	0.33

Tabla 10. Coeficientes de fricción experimental en función de la velocidad de corte (Fuente: [27]).

Por lo tanto, existe un total de 30 simulaciones realizadas en este proyecto, que se clasifican según el siguiente esquema:

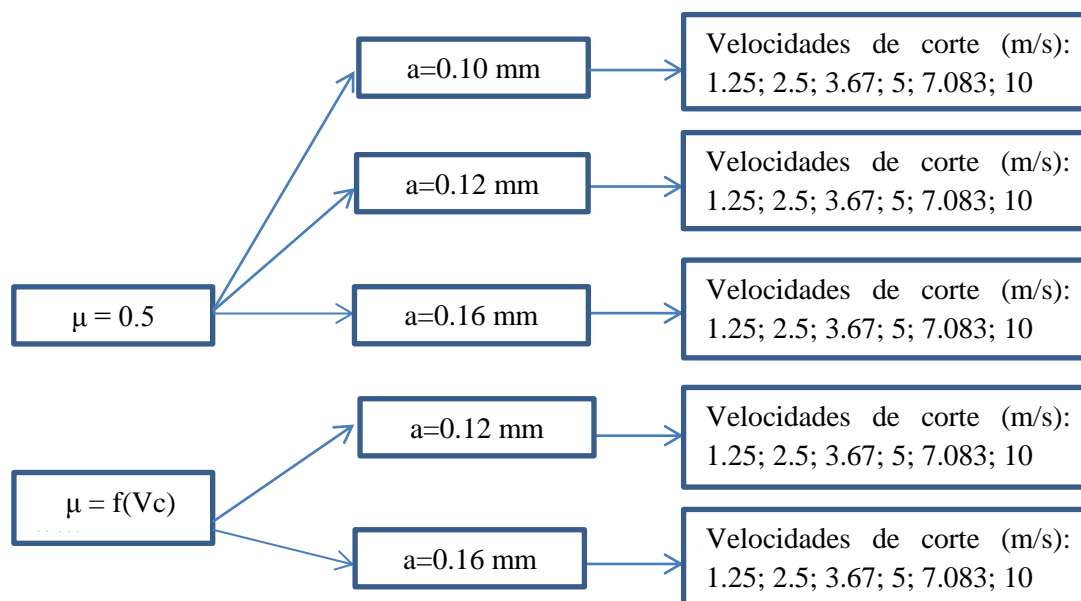


Figura 29. Esquema de las simulaciones realizadas.

De las simulaciones se han obtenido los siguientes resultados:

- La morfología de la viruta que se genera.
- La gráfica de las fuerzas de corte en función del tiempo de corte y sus valores.
- La gráfica de las fuerzas de avance en función del tiempo de corte y sus valores.
- La longitud de contacto.

De esta manera, se puede validar el modelo numérico empleado y determinar la influencia de la velocidad de corte, del avance y del coeficiente de fricción sobre los resultados obtenidos.

CAPÍTULO V

5. Validación y resultados

En este capítulo se recogen los valores obtenidos a partir del modelo numérico empleado y se realiza una comparación con los datos experimentales de la literatura, con la finalidad de validar dicho modelo. Además, se analizan los resultados en detalle para comprobar cómo influyen unos parámetros en otros.

5.1 Validación del modelo numérico

Uno de los objetivos del presente proyecto es validar el modelo numérico empleado. Para ello se debe realizar una comparación entre los datos experimentales y los obtenidos de las simulaciones numéricas. Los valores que se encuentran en la literatura sobre el material de estudio, el acero AISI 1050, son los de las fuerzas de corte y de avance para diferentes combinaciones de velocidades de corte y avance. Por lo tanto, estos son los resultados que se analizan del modelo numérico para poder comprobar si es válido.

A continuación se recopilan en las *tablas 11 y 12* los datos experimentales y los resultados numéricos para los distintos avances y velocidades de corte, siendo el coeficiente de fricción un valor que depende de cada velocidad de corte y que se ha obtenido a partir de las fuerzas experimentales obtenidas y el ángulo de desprendimiento de la herramienta.

AVANCE 0.12 mm						
VELOCIDAD DE CORTE		FUERZA DE CORTE (N)		FUERZA DE AVANCE (N)		COEFICIENTE DE FRICCIÓN
m/s	m/min	Experimental	Abaqus	Experimental	Abaqus	μ
1.25	75	483	418.469	278	189.133	0.7
2.5	150	445	371.275	215	176.076	0.6
3.67	220	431	341.744	195	165.221	0.56
5	300	445	317.085	160	147.974	0.46
7.08	425	428	295.251	183	136.432	0.4
10	600	384	279.612	90	116.043	0.33

Tabla 11. Datos de las fuerzas de corte y avance para un avance de 0.12 mm.

AVANCE 0.16 mm						
VELOCIDAD DE CORTE		FUERZA DE CORTE (N)		FUERZA DE AVANCE (N)		COEFICIENTE DE FRICCIÓN
m/s	m/min	Experimental	Abaqus	Experimental	Abaqus	μ
1.25	75	656	553.929	383	249.405	0.71
2.5	150	592	498.169	263	238.985	0.55
3.67	220	561	459.793	215	192.585	0.49
5	300	581	439.466	194	184.046	0.43
7.08	425	543	417.849	180	169.686	0.4
10	600	512	404.129	119	150.996	0.33

Tabla 12. Datos de las fuerzas de corte y avance para un avance de 0.16 mm.

En un mismo gráfico se representan los datos obtenidos en las simulaciones con los datos experimentales para un avance de 0.12 mm y otro gráfico para un avance de 0.16 mm, ambas para un coeficiente de fricción dependiente de la velocidad de corte. Los datos de los ensayos se representan con puntos mientras que los resultados numéricos se representan mediante líneas.

Como ya se comentó en el *Capítulo III*, las fuerzas de corte y de avance presentan, para unas velocidades de corte bajas, un descenso progresivo hasta alcanzar un valor constante.

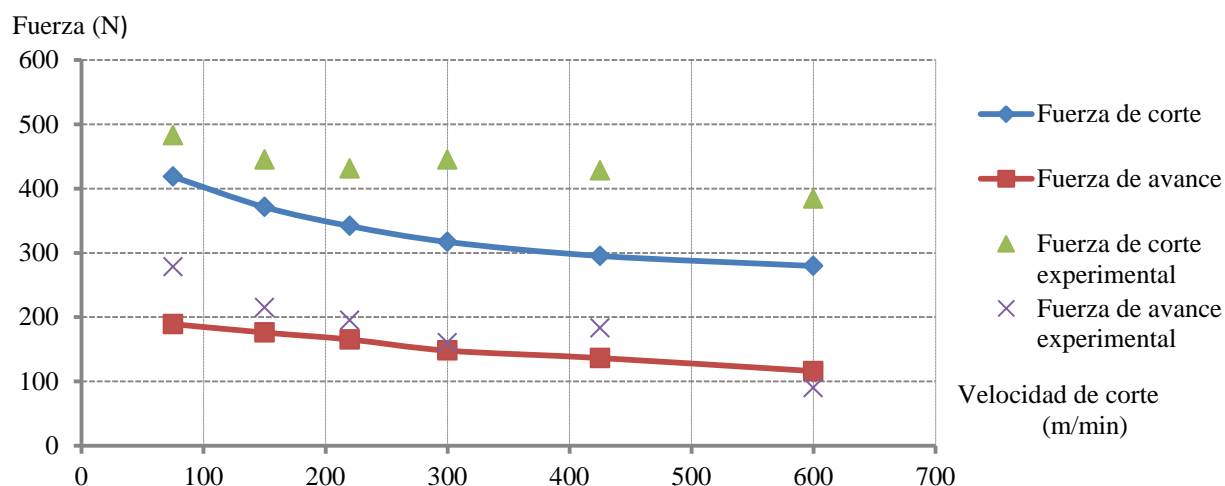


Figura 30. Gráfica de las fuerzas obtenidas del programa y experimentales para un avance de 0.12 mm.

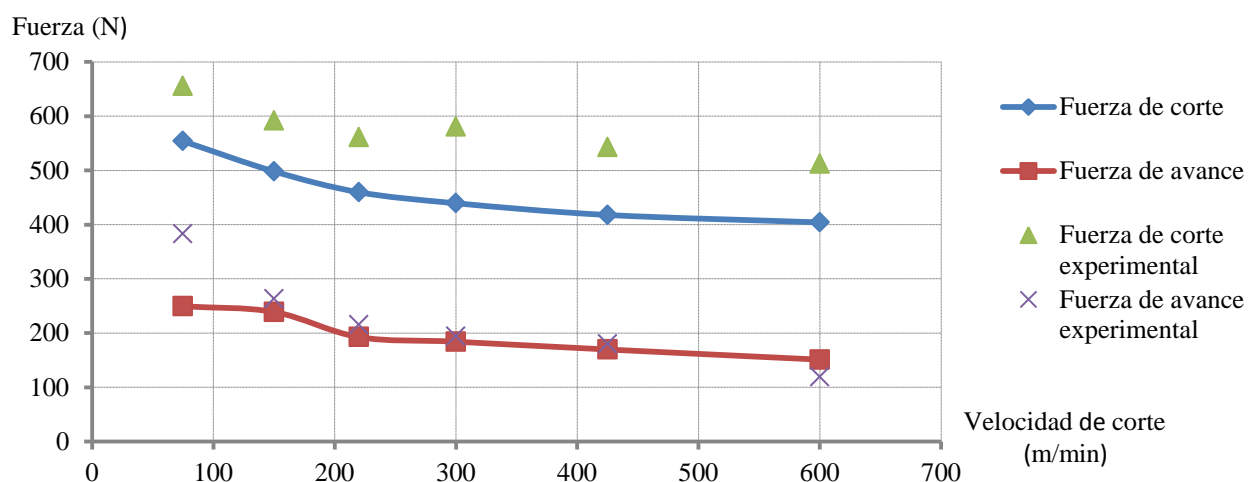


Figura 31. Gráfica de las fuerzas obtenidas del programa y experimentales para un avance de 0.16 mm.

Como se puede observar en las gráficas de las *figuras 30 y 31*, existen algunas diferencias entre los resultados y los ensayos experimentales. Estas diferencias se deben principalmente a que los ensayos se realizan con material real y sus propiedades y, a partir de ahí, se conoce su comportamiento, mientras que en las simulaciones numéricas se ha utilizado una ley de comportamiento del material descrita anteriormente en el *apartado 4.5 “Ecuación constitutiva del material de la pieza”*. Además, la herramienta de corte del modelo numérico presenta un radio de punta de $2 \cdot 10^{-5}$ m que influye en los resultados que se obtienen. A pesar de ello, estas diferencias no son significativas y presentan, tanto los datos experimentales como los resultados de los ensayos, la misma tendencia y, además, los valores son similares. Por lo tanto, se puede concluir que el modelo numérico empleado en este proyecto a partir del método de elementos finitos es válido para simular el proceso de mecanizado por corte ortogonal y el material de estudio, AISI 1050, presenta un comportamiento adecuado.

5.2 Resultados

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, solo se encuentran en la literatura datos experimentales del acero al carbono AISI 1050 sobre las fuerzas de corte y de avance, por lo que los valores de las fuerzas de dichos ensayos se emplean para realizar la comparación con los resultados de las simulaciones numéricas y proceder a la validación del modelo numérico que se ha utilizado.

Sin embargo, en este apartado se explica cómo influyen las variables independientes como son la velocidad de corte, el coeficiente de fricción y el avance, sobre las variables dependientes como son las fuerzas de corte y de avance, la morfología de la viruta y la longitud de contacto. Además, se describe el procedimiento que se ha empleado para calcular cada uno de los resultados y se obtienen diferentes conclusiones.

5.2.1 Estudio de las fuerzas de corte y de avance

A partir de las simulaciones numéricas realizadas mediante el programa, se han obtenido gráficas que proporcionan información sobre las fuerzas de corte y de avance.

El procedimiento que se ha seguido para calcular las fuerzas se explica más adelante. Se han realizado 30 simulaciones a lo largo de este proyecto, variando diferentes parámetros. En un primer momento, la única variable que se modifica es la velocidad de corte, que toma valores diferentes (75, 150, 220, 300, 425 y 600 m/min), manteniendo constante la fricción (de

valor 0.5) y el avance (0.10 mm) y con esta configuración se obtienen las seis primeras simulaciones. A continuación, manteniendo el coeficiente de fricción con el mismo valor, se modificará el avance, que tomará diferentes valores (0.12 y 0.16 mm) y se realizarán 6 simulaciones para cada avance, cada una con una velocidad de corte distinta. Finalmente, se modifica no solo la velocidad de corte y el avance, sino también el coeficiente de fricción que varía en cada simulación con la velocidad de corte. De esta manera, se obtienen gráficas y tablas de valores en cada simulación, con el fin de analizar la influencia de cada parámetro en los resultados.

Mediante la herramienta de cálculo ABAQUS/*Explicit* se obtienen en todas las simulaciones numéricas, las gráficas de las fuerzas de corte y las fuerzas de avance en función del tiempo de corte. Como ya se ha mencionado anteriormente, el tiempo de corte para cada simulación es diferente, ya que para una profundidad constante, cuanto mayor sea la velocidad de corte, menor será el tiempo que se emplea en mecanizarlo. En todas las gráficas, se aprecian dos curvas de diferentes colores, cada una de las cuales corresponde con una fuerza. La curva roja es la fuerza de corte y la curva azul es la fuerza de avance. Además, las curvas de las fuerzas se encuentran en la parte negativa del eje de ordenadas (*figura 32.a*) pero esto es debido a la colocación del sistema de referencia del programa con respecto a la dirección del proceso de mecanizado. Sin embargo, el programa permite escoger otro tipo de gráfico simétrico al anterior con respecto al eje de abscisas (*figura 32.b*) de manera que se obtienen las fuerzas reales con valor positivo. Durante el proyecto se han empleado las gráficas con valores negativos de las fuerzas, pero teniendo en cuenta dicha simetría para obtener los valores reales de las fuerzas y utilizar los valores positivos.

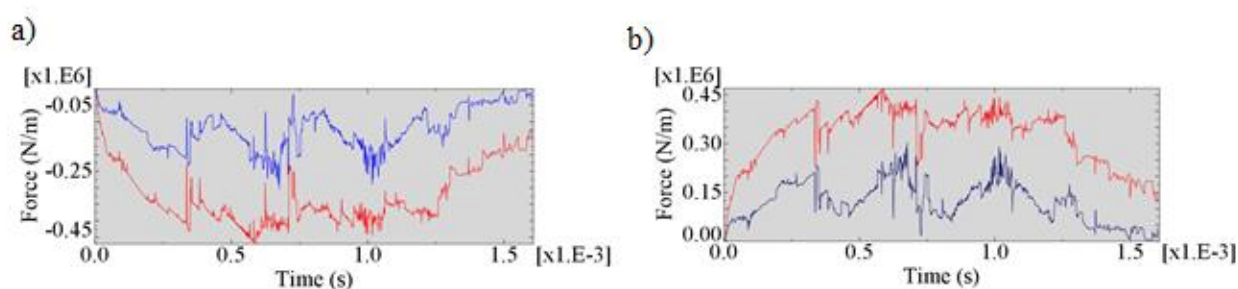


Figura 32. Gráficas fuerza-tiempo proporcionadas por el programa ($V_c=75$ m/min; $a=0.12$ mm; $\mu=0.5$).

Como se puede observar en la *figura 33*, en la que se ha cogido una gráfica con las fuerzas en positivo, ambas curvas crecen inicialmente hasta un punto y a partir de este, las fuerzas oscilan

durante la mayor parte del tiempo de mecanizado hasta otro punto, a partir del cual su valor decrece progresivamente. Como se ha mencionado anteriormente, las gráficas *fuerza-tiempo* obtenidas para este proyecto tienen las fuerzas en valores negativos. Sin embargo, para calcular los valores medios de la fuerza de corte y de avance para cada velocidad de corte, se deben emplear los valores positivos de las fuerzas que proporciona el propio programa. Para calcular dicho valor medio de la fuerza de corte y de avance, se toman todos los valores comprendidos entre el punto donde termina el crecimiento inicial y el punto donde comienza el decrecimiento final, es decir, el tramo en el que las fuerzas oscilan. Estos límites corresponden en la *figura 33* con las líneas verticales discontinuas. De esta manera se obtiene, para cada simulación numérica, un valor medio de la fuerza de corte y de la fuerza de avance.

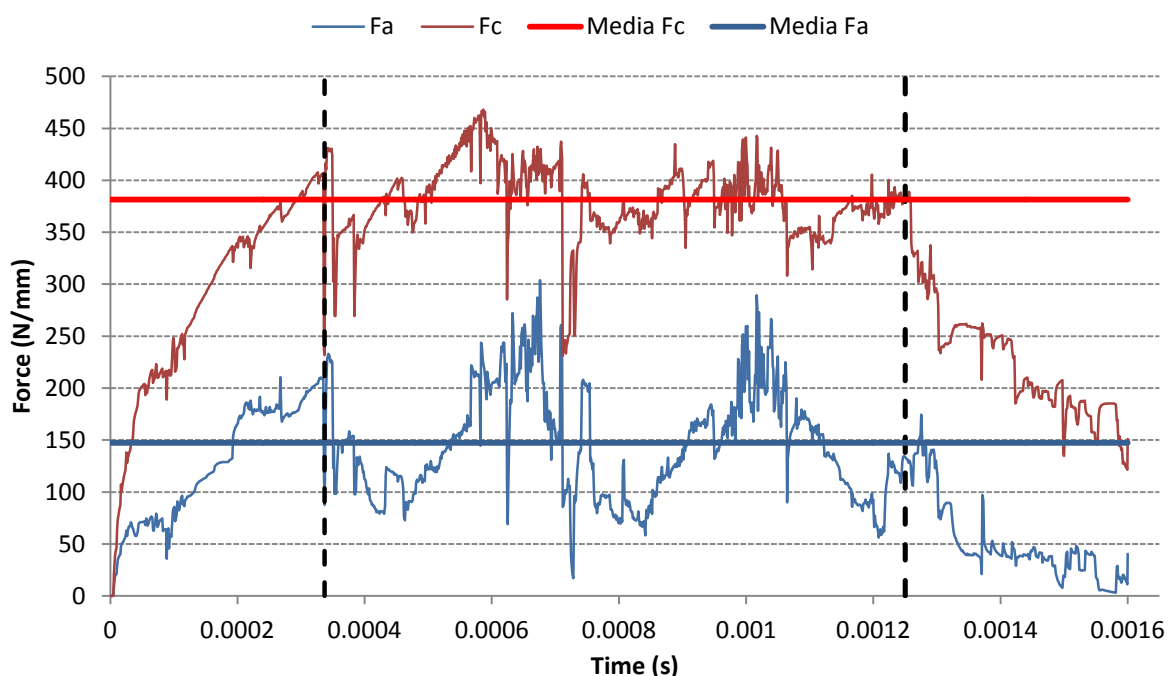


Figura 33. Tendencia de las gráficas *fuerza-tiempo*.

A pesar de que se realiza un modelo bidimensional, el programa establece una tercera dimensión, que corresponde con la profundidad de corte, de valor una unidad. En el caso de este proyecto, se trabaja con unidades del Sistema Internacional (SI), por lo que este parámetro que se establece es de 1 metro. Sin embargo, en la gráfica de la *figura 33* se han representado las fuerzas para 1 mm de profundidad de corte. Todas las gráficas de todas las simulaciones numéricas que se realizan en este proyecto son similares, por lo que se muestran diferentes gráficas, cada una con una configuración diferente. A modo de ejemplo, se muestran las gráficas *fuerza-tiempo* para cada velocidad de corte, con un valor de avance de 0.12 mm y un

coeficiente de fricción constante y de valor 0.5. De esta manera se puede comparar cada gráfica *fuerza-tiempo* para diferentes velocidades de corte. Se puede comprobar en el eje de abscisas que, a cada velocidad de corte, le corresponde un tiempo de corte determinado, calculado anteriormente e impuesto en cada archivo .INP de la simulación.

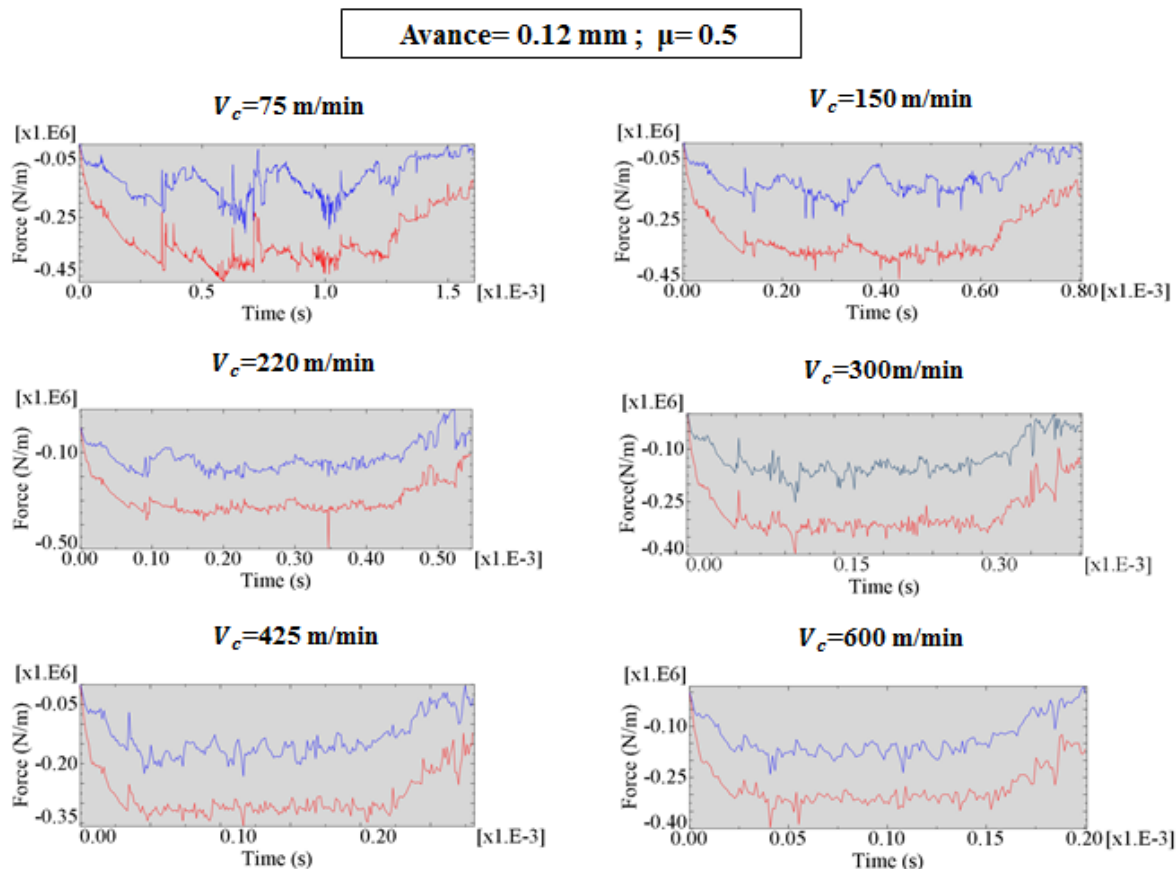


Figura 34. Gráficas *fuerza-tiempo* para cada velocidad de corte ($a=0.12$ mm y $\mu=0.5$).

De la misma manera se muestran gráficas que representan cada una de las modificaciones realizadas en el proyecto. En la gráfica de la *figura 35.a*, la configuración es la siguiente: el avance es 0.16 mm, el coeficiente de fricción es 0.5 y la velocidad de corte es 75 m/min. Por lo tanto, el coeficiente de fricción y la velocidad de corte se mantienen respecto a la gráfica de la *figura 34* para velocidad de 75 m/min. Así, se puede observar cómo influye en este tipo de gráfica la modificación del avance.

Por otro lado, en la gráfica de la *figura 35.b*, la configuración es la siguiente: el avance es 0.12 mm, el coeficiente de fricción está en función de la velocidad de corte, que es 75 m/min. Por lo tanto, el avance y la velocidad de corte se mantienen respecto a la gráfica de la *figura 34* para velocidad de 75 m/min. De esta manera se observa cómo varía la gráfica con la modificación de la fricción.

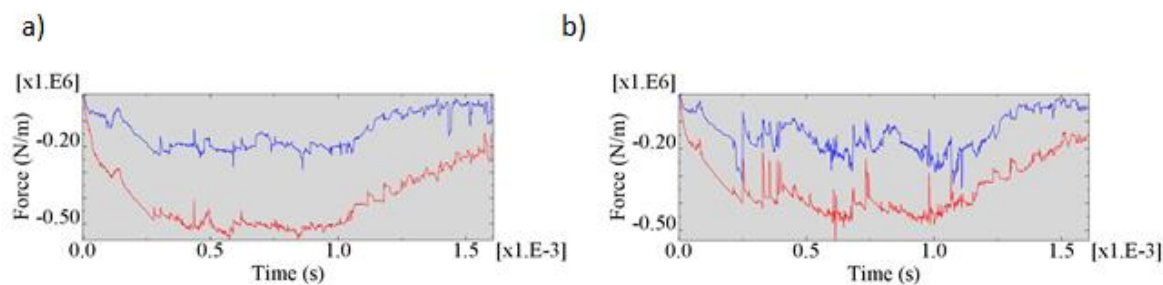


Figura 35. Gráfica fuerza-tiempo para una velocidad de corte de 75 m/min y: (a) un avance de 0.16 mm y $\mu = 0.5$; (b) un avance de 0.12 mm y $\mu = f(V_c)$.

Se observa que en ambos casos, la tendencia de la gráfica es la misma, por lo que todos los valores de fuerzas de corte y fuerzas de avance se calculan de la misma manera.

A continuación se recopilan todos los resultados de las fuerzas de corte y de avance obtenidos de las simulaciones numéricas para cada una de las configuraciones que se estudian.

FUERZA DE CORTE (N)					
VELOCIDAD DE CORTE		AVANCE: 0.12 mm		AVANCE: 0.16 mm	
m/s	m/min	$\mu = 0.5$	$\mu = f(V_c)$	$\mu = 0.5$	$\mu = f(V_c)$
1.25	75	381.438	418.469	504.217	553.929
2.5	150	352.27	371.275	483.319	498.169
3.67	220	327.547	341.744	460.405	459.793
5	300	316.551	317.085	451.613	439.466
7.08	425	314.048	295.251	421.966	417.849
10	600	312.861	279.612	427.228	404.129

Tabla 13. Fuerzas de corte obtenidas de las simulaciones numéricas para diferentes condiciones de corte.

FUERZA DE AVANCE (N)					
VELOCIDAD DE CORTE		AVANCE: 0.12 mm		AVANCE: 0.16 mm	
m/s	m/min	$\mu = 0.5$	$\mu = f(V_c)$	$\mu = 0.5$	$\mu = f(V_c)$
1.25	75	147.294	189.133	198.039	249.405
2.5	150	141.453	176.076	203.844	238.985
3.67	220	145.393	165.221	196.833	192.585
5	300	156.856	147.974	198.927	184.046
7.08	425	167.201	136.432	191.858	169.686
10	600	170.332	116.043	199.776	150.996

Tabla 14. Fuerzas de avance obtenidas de las simulaciones numéricas para diferentes condiciones de corte.

Con los valores que se recogen en las *tablas 13 y 14*, se representan las fuerzas de corte y de avance con respecto a la velocidad de corte. Se realiza una primera gráfica con los valores de las fuerzas de corte, diferenciando cuatro curvas, combinándose en ellas el avance, que puede ser 0.12 o 0.16 mm, y el coeficiente de fricción, que puede ser constante (de valor 0.5) o en función de la velocidad de corte.

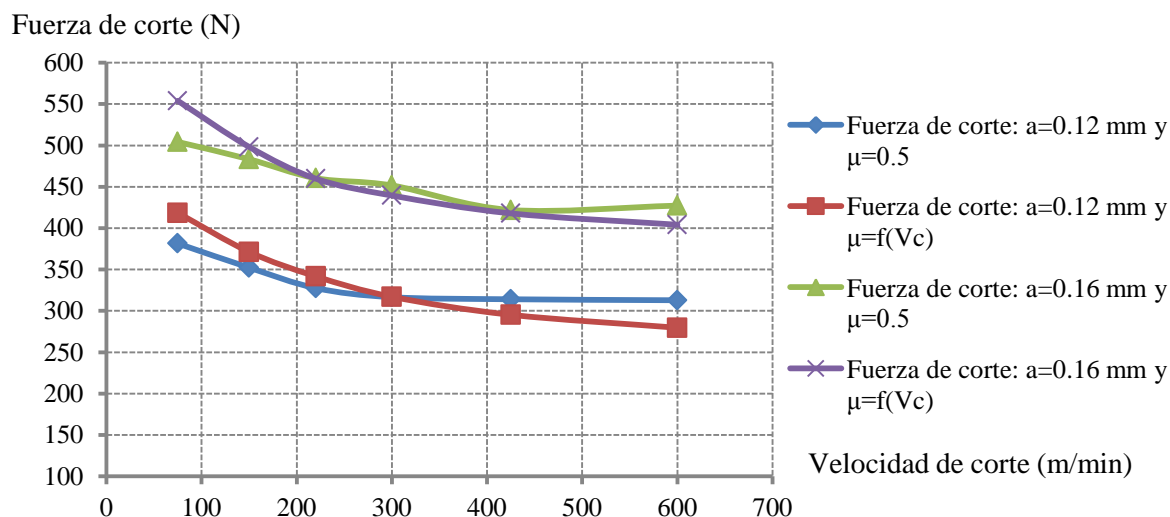


Figura 36. Gráfica de las fuerzas de corte obtenidas de las simulaciones frente a la velocidad de corte para diferentes condiciones de avance y fricción.

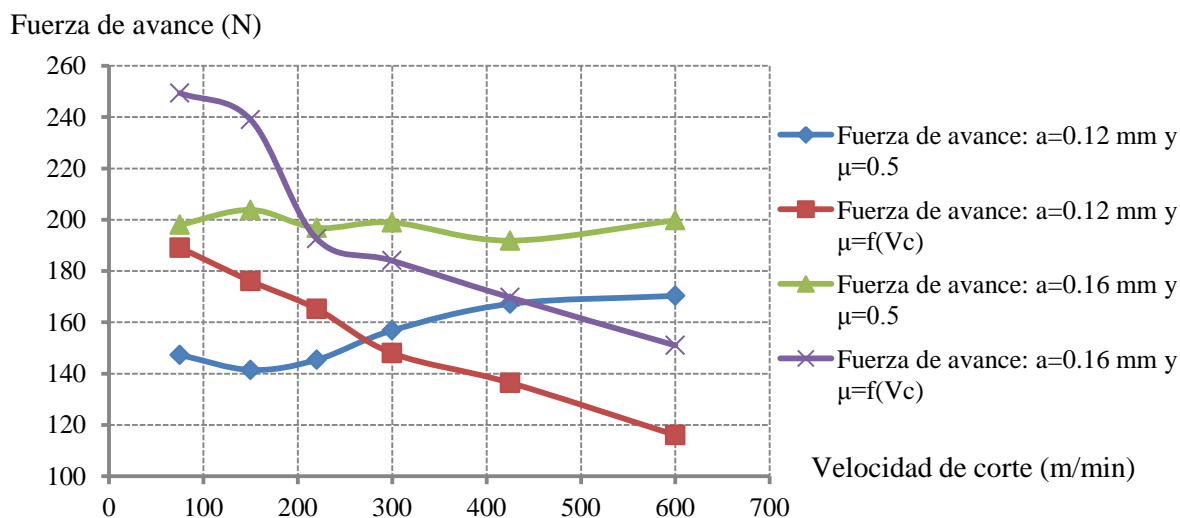


Figura 37. Gráfica de las fuerzas de avance obtenidas de las simulaciones frente a la velocidad de avance para diferentes condiciones de avance y fricción.

En la gráfica de la *figura 37* se observa que las fuerzas de avance, para un coeficiente de fricción constante y de valor 0.5, no presentan la misma tendencia de disminuir a medida que aumenta la velocidad de corte. Es por ello que se ha modificado la fricción a un valor que se obtiene experimentalmente y que depende de la velocidad de corte. De esta manera, las curvas

roja y morada, que representan la fuerza de avance frente a la velocidad de corte para diferentes avances y coeficientes de fricción en función de la velocidad de corte, sí que tienen la misma tendencia que la que presentan los resultados experimentales.

5.2.1.1 *Influencia de la velocidad de corte sobre las fuerzas de corte y de avance*

Para comprobar cómo influye la velocidad de corte en las fuerzas de corte y de avance, se analizan las gráficas en las que la fricción depende de la velocidad de corte. Se observa en los resultados numéricos recogidos en las *tablas 13 y 14*, y representados en las gráficas de las *figuras 36 y 37*, que a medida que aumenta la velocidad de corte, las fuerzas de corte y de avance disminuyen y tienen una tendencia a alcanzar un valor constante. Aunque realizando un estudio de dichas gráficas, únicamente se han lanzado simulaciones para velocidades menores de 10 m/s, sí se puede apreciar que las fuerzas inicialmente disminuyen progresivamente y a medida que aumenta la velocidad, esa disminución es cada vez menor, por lo que alcanzará un valor constante. Esto se debe a que a partir de un valor de la velocidad de corte, el material se satura y la temperatura se mantiene constante independientemente del valor de la velocidad de corte, por lo que la fuerza se estabiliza.

Para un avance constante de 0.12 mm y fricción en función de la velocidad, la fuerza de corte a la que tiende es de 280 N aproximadamente, mientras que la fuerza de avance es de 116 N. Por otro lado, para un avance de 0.16 mm y fricción en función de la velocidad, el valor constante de la fuerza de corte y de avance que se alcanza es de 405 N y 151 N, respectivamente.

Como ya se ha comentado, en el proceso de mecanizado toda la energía mecánica necesaria para la generación de viruta se transforma en calor que se disipa por la zona de desprendimiento, la zona de cizallamiento y la zona de incidencia del filo de corte. El calor disipado en la zona de contacto entre la viruta y la herramienta y la zona de cizalladura primaria, va a influir directamente en los resultados de las fuerzas.

Al aumentar la velocidad de corte, la temperatura en ambas zonas aumenta de manera considerable y provoca un ablandamiento debido a la sensibilidad a la temperatura que presenta el material mediante la ley de Johnson-Cook, implementada en el programa. Todo ello provoca que los esfuerzos necesarios para romper el material y la fuerza de corte disminuyan. En la zona de contacto entre la herramienta y la viruta, al aumentar la temperatura debido al calor disipado en esta zona, provoca diferentes condiciones de fricción. Por lo tanto, a medida que aumenta la velocidad de corte, la fricción disminuye y también la resistencia al deslizamiento

entre la superficie de la herramienta y la viruta y, en consecuencia, las fuerzas de avance también disminuyen.

5.2.1.2 Influencia del avance sobre las fuerzas de corte y de avance

En la gráfica de la *figura 36* se puede observar que las curvas de color rojo y morado, corresponden con los valores de las fuerzas de corte para una fricción variable y un avance de 0.12 y 0.16 mm, respectivamente. Por lo tanto se observa cómo a medida que aumenta el avance, las fuerzas de corte aumentan. En valores numéricos, se observa en la *tabla 13* que para una velocidad de 10 m/s, la fuerza de corte para 0.12 mm es de 279.612 N, mientras que para 0.16 mm es de 404.129 N. De la misma manera ocurre con la fuerza de avance en la *tabla 14*, en la que para la misma velocidad de corte, la fuerza de avance para 0.12 mm es de 116.043 N, mientras que para 0.16 mm es de 150.996 N. Sin embargo, para ambos avances y ambos tipos de fuerza, la tendencia de las curvas en las gráficas es la misma.

5.2.1.3 Influencia del coeficiente de fricción sobre las fuerzas de corte y de avance

Como se ha comentado anteriormente, a partir de los valores de las fuerzas de corte y de avance obtenidos en los ensayos, se obtiene un coeficiente de fricción experimental. Por lo tanto, como las fuerzas dependen directamente de la velocidad de corte, éste depende también directamente de este parámetro de corte. Así, aunque inicialmente se ha empleado un valor constante del coeficiente de fricción ($\mu=0.5$), atendiendo a los datos experimentales se emplea un nuevo coeficiente que depende directamente de la velocidad de corte, como se observa en la gráfica de la *figura 38* para los dos avances.

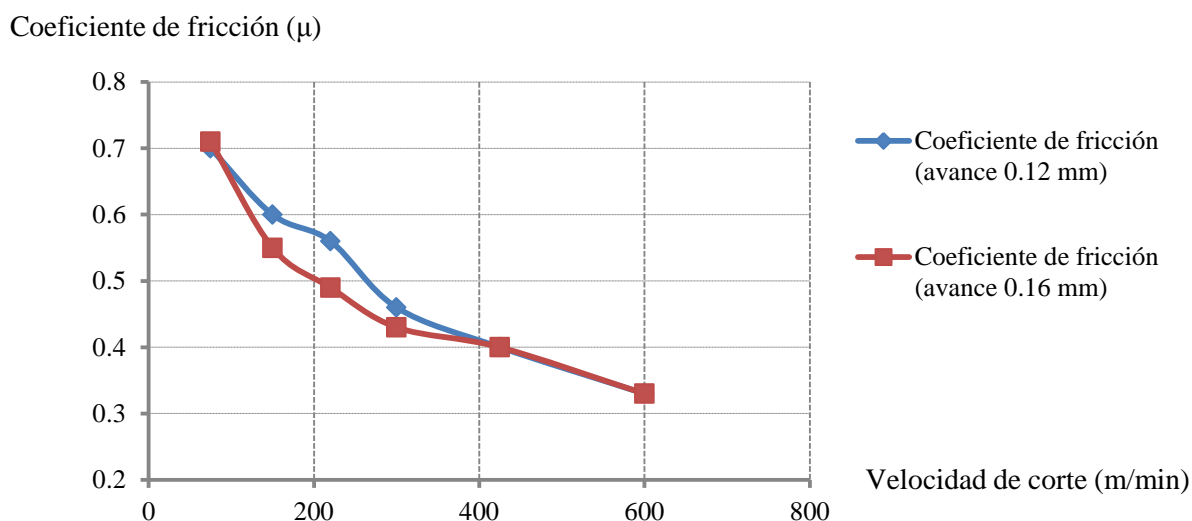


Figura 38. Gráfica de coeficiente de fricción-velocidad de corte para diferentes avances.

Por lo tanto, para cada velocidad de corte existe un coeficiente de fricción diferente, y en consecuencia, las fuerzas varían con respecto a los valores obtenidos para una fricción constante. Según la gráfica de la *figura 38*, el coeficiente de fricción disminuye con el aumento de velocidad de corte y, por lo tanto, disminuyen las fuerzas. Esto se debe a que al aumentar la velocidad, aumenta también la temperatura debido a la disipación de calor, por lo que el material se reblandece y se necesitan menos esfuerzos para romper el material. De la misma manera, al aumentar el coeficiente de fricción, el rozamiento entre la superficie de la herramienta y la viruta va a aumentar y, en consecuencia, se necesitan esfuerzos mayores para generar viruta. Esto se puede observar numéricamente en las *tablas 13 y 14* con los resultados obtenidos. Para una velocidad de corte constante y de valor 75 m/min, un coeficiente de fricción de 0.5 y un avance de 0.12 mm, las fuerzas de corte y avance son, 381.438 N y 147.294 N, respectivamente. Sin embargo, si se emplea para esa misma velocidad un coeficiente de fricción en función de la velocidad de corte y de valor 0.7, es decir, aumenta el coeficiente de fricción, las fuerzas de corte y de avance son, respectivamente, 418.469 N y 189.133 N. Por lo tanto, a partir de los resultados de las simulaciones numéricas, se comprueba como un aumento de coeficiente de fricción conlleva un aumento de las fuerzas.

5.2.2 Estudio de la morfología de la viruta

Este apartado está dedicado al estudio de la influencia de los parámetros de corte sobre la morfología de la viruta. Para ello, se utiliza el programa de cálculo y se recogen imágenes de cada simulación para la misma distancia mecanizada, con la finalidad de poder realizar una comparación entre todas. Estas capturas se toman a mitad de la longitud de mecanizado, es decir, cuando la herramienta recorre 1 mm.

5.2.2.1 Influencia de la velocidad de corte en la morfología de la viruta

En la *figura 39* se muestran todos los resultados obtenidos para un avance de 0.12 mm y un coeficiente de fricción constante ($\mu=0.5$) con la finalidad de analizar la influencia de cada velocidad de corte, ya que se aprecia la morfología de la viruta en su totalidad.

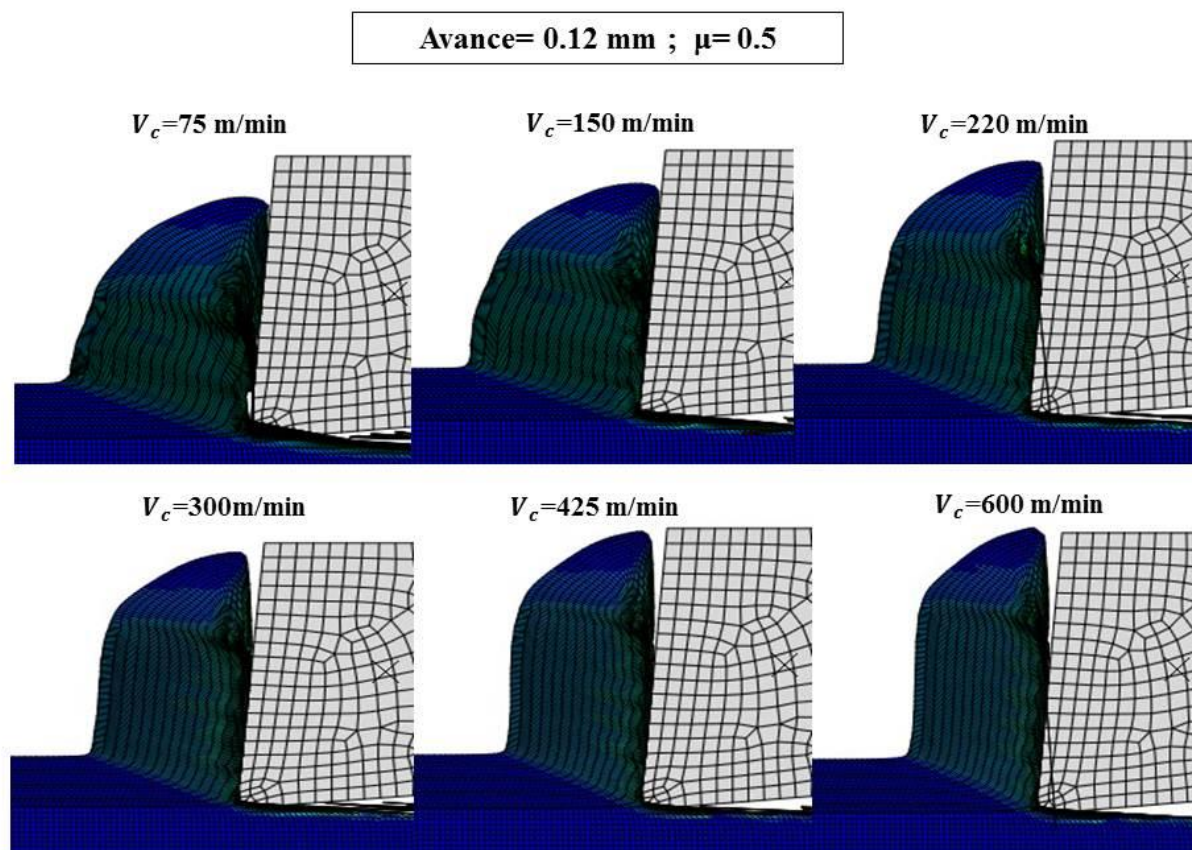


Figura 39. Morfología de la viruta para diferentes velocidades de corte ($a=0.12$ mm y $\mu=0.5$).

Atendiendo a los resultados de la *figura 39* se puede apreciar cómo la viruta es continua para todas las velocidades de corte estudiadas. Además, a medida que aumenta la velocidad de corte, la viruta resulta ser más esbelta, es decir, el espesor de la viruta deformada va disminuyendo. Por otro lado, la longitud de contacto también disminuye con la velocidad de corte. Todos las simulaciones de corte siguen esta misma tendencia. De esta manera, se muestran los resultados obtenidos para diferentes configuraciones en las que se combinan distintos valores de avance y de coeficiente de fricción con la velocidad mínima ($V_c=75$ m/min), una velocidad intermedia ($V_c=300$ m/min) y la velocidad máxima ($V_c=600$ m/min). En la *figura 40.a* se muestran los resultados para un avance de 0.12 mm y un coeficiente de fricción que depende de la velocidad de corte; en la *figura 40.b* se muestran los resultados obtenidos para un avance de 0.16 mm y un coeficiente de fricción constante y de valor 0.5; en la *figura 40.c* se muestran los resultados para un avance de 0.16 mm y un coeficiente de fricción en función de la velocidad de corte. Se puede observar que presentan la misma tendencia con respecto a la esbeltez de la viruta.

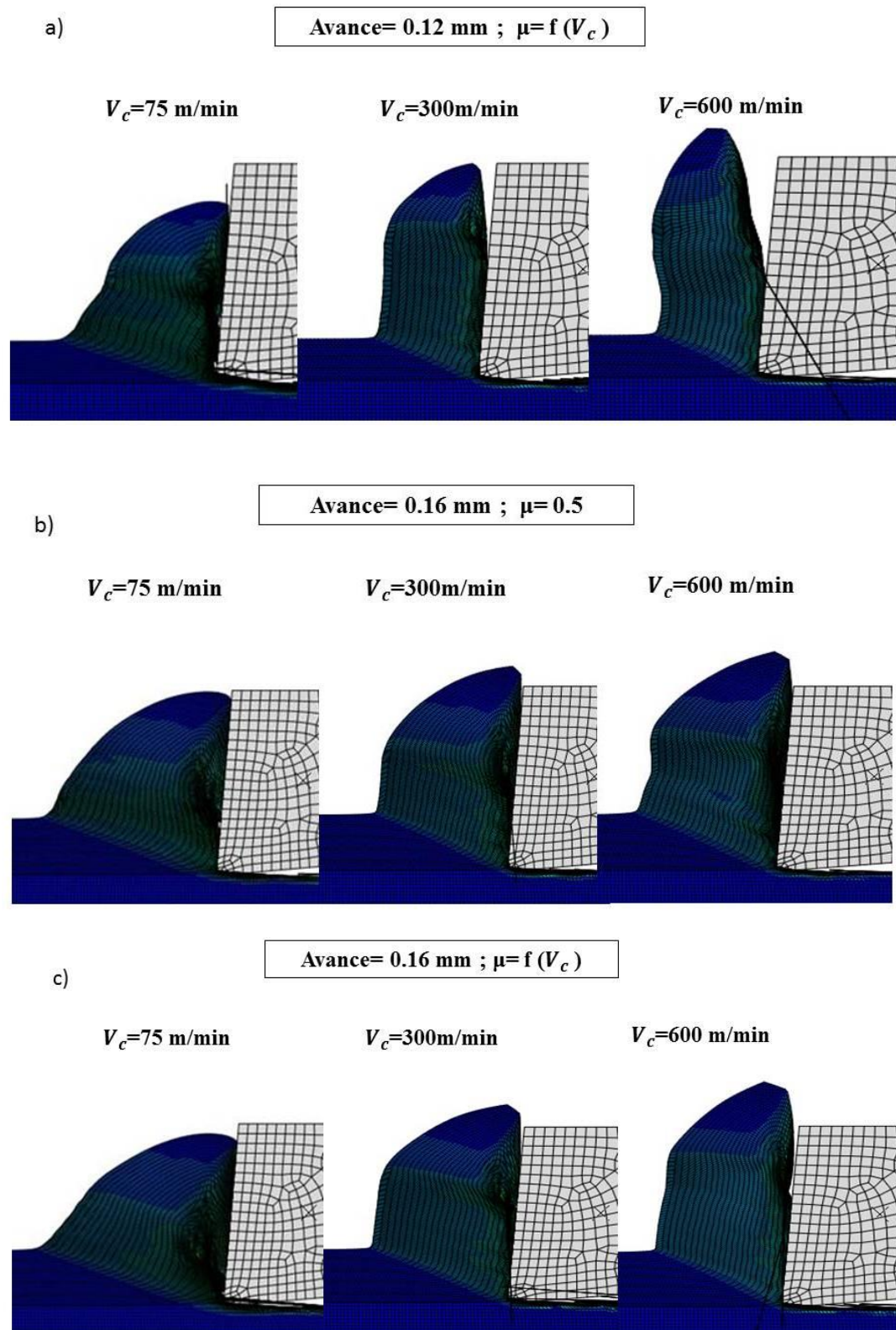


Figura 40. Morfología de la viruta para diferentes velocidades de corte: (a) $a=0.12 \text{ mm}$ y $\mu=f(V_c)$; (b) $a=0.16 \text{ mm}$ y $\mu=0.5$; (c) $a=0.16 \text{ mm}$ y $\mu=f(V_c)$.

A partir del programa también se puede obtener la longitud de contacto en función de la velocidad de corte. El análisis de la influencia de la velocidad de corte en ese parámetro, se recoge en el apartado 5.2.3. “Estudio de la longitud de contacto”.

5.2.2.2 Influencia del avance y el coeficiente de fricción en la morfología de la viruta

Como se observa al comparar las figuras 39 y 40.b, para las cuales el coeficiente de fricción es constante y de valor 0.5, el espesor de la viruta deformada y la longitud de contacto son mayores a medida que aumenta el avance.

Para comparar la influencia del coeficiente de fricción sobre la morfología, se analizan las figuras 39 y 40.a, en particular para el caso de la velocidad máxima (600 m/min) que es en el que mejor se aprecia la diferencia. Cabe destacar que en la figura 39, el coeficiente de fricción utilizado es de 0,5 mientras que en la figura 40.a se emplea un coeficiente de fricción que depende de la velocidad de corte (en particular para la velocidad máxima es de 0.33). Por lo tanto, para esta disminución del coeficiente de fricción se observa que aumenta la esbeltez de la viruta.

A continuación se realiza un estudio particular de la longitud de contacto, a pesar de que ya se ha comentado la influencia de las distintas variables sobre este parámetro al realizar el estudio de la morfología de la viruta.

5.2.3 Estudio de la longitud de contacto

Por último, se realiza un estudio de la influencia de los parámetros de corte sobre la longitud de contacto entre la viruta y la herramienta. A partir del programa se puede obtener el valor de la longitud de contacto, midiendo desde la punta de la herramienta hasta el punto donde la viruta y la herramienta dejan de tener contacto a lo largo de la superficie de desprendimiento como se muestra en la figura 41.

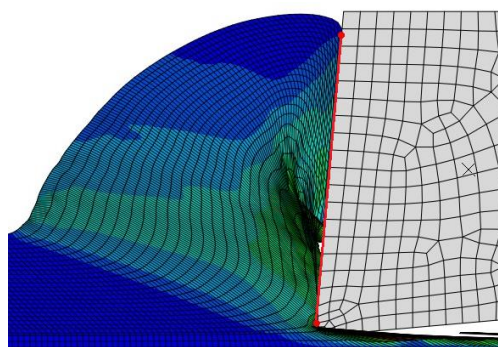


Figura 41. Longitud de contacto entre viruta-herramienta.

Las mediciones de la longitud de contacto se realizan todas a la mitad de la distancia a mecanizar para poder compararlas. Sin embargo, se han realizado mediciones en una de las simulaciones a diferentes longitudes de mecanizado para conocer si la longitud de contacto es constante a lo largo del proceso. Para la simulación en la que la velocidad de corte es 75 m/min, el avance es 0.12 mm y el coeficiente de fricción es 0.5, se han recogido los valores de la longitud de contacto a lo largo de la distancia mecanizada. Debido a la velocidad escogida, el tiempo total de corte es 0.0016 s, y se han tomado valores en tramos equidistantes. Estos valores se han recogido en la *tabla 15* y representados en la gráfica de la *figura 42*.

Tiempo de mecanizado (s)	0.0002	0.0004	0.0006	0.0008	0.0010	0.0012	0.0014	0.0016
Longitud de contacto (μm)	152.904	232.849	320.168	320.016	378.38	291.061	130.27	51.27

Tabla 15. Datos de la longitud de contacto a lo largo de la distancia mecanizada.

Longitud de contacto (μm)

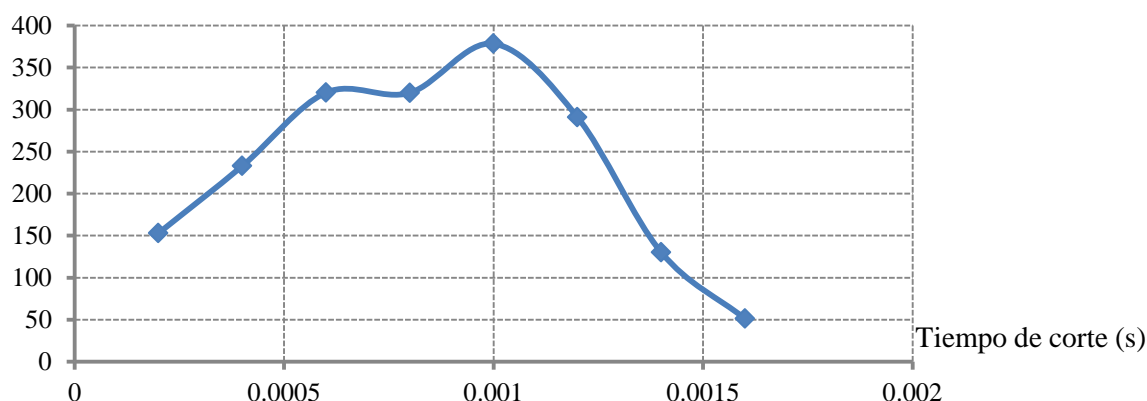


Figura 42. Gráfica longitud de contacto-tiempo de corte ($V_c=75$ m/min; $a=0.12$ mm; $\mu=0.5$).

Se observa que la longitud de contacto no es constante y que, por lo tanto, depende del tiempo de corte. Este parámetro aumenta hasta un punto de la longitud de mecanizado a partir del cual descende. Esta tendencia está presente en todas las simulaciones.

Se recogen los datos de la longitud de contacto para un avance constante de 0.12 mm, tanto para un coeficiente de fricción constante y de valor 0.5, como para un coeficiente de fricción que depende de la velocidad de corte. Por otro lado, se recogen los valores para el coeficiente de fricción constante y un avance de 0.16 mm, para analizar cómo afecta el avance a la longitud de contacto. Todos los valores quedan recogidos en la *tabla 16*.

VELOCIDAD DE CORTE m/min	LONGITUD DE CONTACTO (μm) Avance= 0.12 mm		LONGITUD DE CONTACTO (μm) Avance= 0.16 mm
	$\mu = 0.5$	$\mu = f(V_c)$	$\mu = 0.5$
75	320	372.782 ($\mu = 0.7$)	483.949
150	293.061	320.016 ($\mu = 0.6$)	401.653
220	223.179	291.061 ($\mu = 0.56$)	378.380
300	220.931	217.657 ($\mu = 0.46$)	367.465
425	216.532	186.003 ($\mu = 0.40$)	320.168
600	203.743	163.119 ($\mu = 0.33$)	297.458

Tabla 16. Valores de la longitud de contacto para diferentes condiciones de avance y fricción.

A continuación se representan en la gráfica de la figura 43 los valores de las longitudes de contacto para un coeficiente de fricción de 0.5 y distintos avances, para comprobar cómo afecta este parámetro en los resultados de la longitud de contacto.

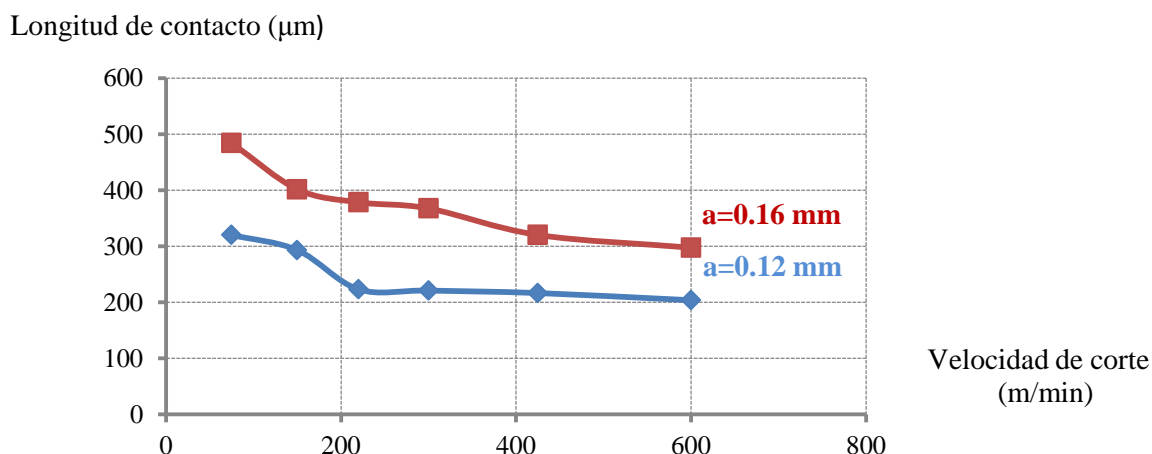


Figura 43. Gráfica longitud de contacto-velocidad de corte para diferentes avances.

Se observa que con un aumento del avance, para un coeficiente de fricción constante, los valores de la longitud de contacto aumentan.

Si se realiza una gráfica que relacione la longitud de contacto con la velocidad de corte, aparecen dos curvas, una para el coeficiente de fricción constante y otra para el coeficiente de fricción en función de la velocidad de corte.

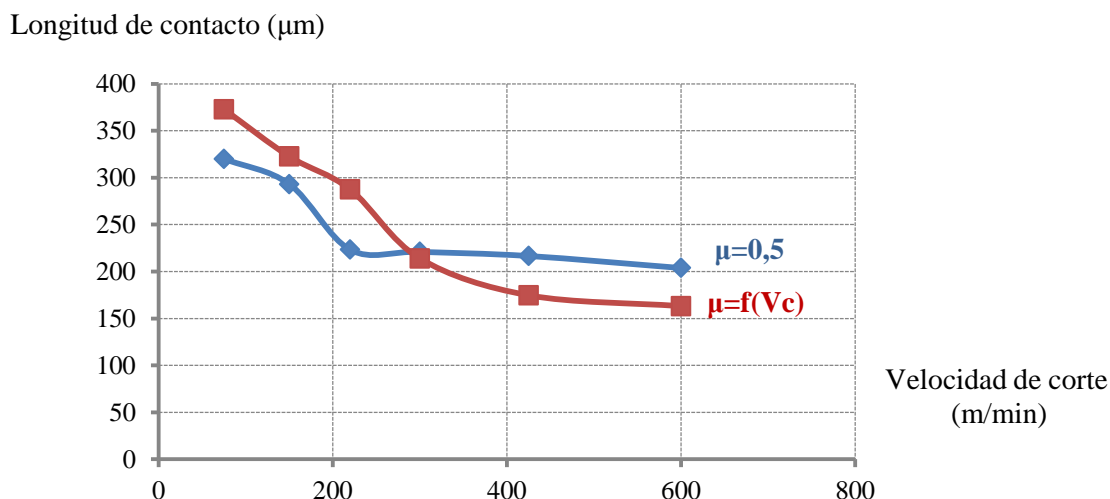


Figura 44. Gráfica longitud de contacto-velocidad de corte para diferentes coeficientes de fricción.

A partir de la gráfica de la figura 44 se obtienen dos conclusiones principales:

1. La longitud de contacto disminuye a medida que aumenta la velocidad de corte. Se aprecia que a partir de una velocidad de corte crítica, la longitud de corte se estabiliza.
2. A medida que aumenta el coeficiente de fricción, la longitud de contacto aumenta. Se aprecia con los valores de la tabla 16 y la ayuda de la gráfica de la figura 44, que para las tres primeras velocidades de corte estudiadas, el coeficiente de fricción en función de la velocidad de corte es mayor que 0.5, por lo que las longitudes de contacto son mayores. A partir de la velocidad de 300 m/min, el coeficiente de fricción es menor que 0.5 y, en consecuencia, disminuye la longitud de contacto. Por lo tanto, esta longitud de contacto sigue la misma tendencia que el coeficiente de fricción al modificar la velocidad de corte.

CAPÍTULO VI

6. Entorno socioeconómico y presupuesto

En este capítulo se muestra el presupuesto para la realización de este proyecto, así como su impacto socioeconómico.

6.1 Entorno socioeconómico

Como se ha comentado en el presente proyecto, las simulaciones numéricas lanzadas en la herramienta de cálculo ABAQUS/*Explicit*, basada en el método de elementos finitos, permiten obtener resultados teóricos y, en consecuencia, ahorrar en tiempo y costes, todo el proceso de realizar ensayos y obtener datos experimentales. Este método utiliza un modelo numérico que puede ser modificado de manera sencilla (su geometría, material y parámetros de corte,...) y permite obtener resultados fiables y muy aproximados, sin necesidad de emplear numerosos prototipos de ensayo y, por lo tanto, ahorrando en coste y en tiempo empleado en la preparación, mantenimiento y ensayo.

Todo esto produce beneficios en la industria y le ayuda a mejorar su productividad y eficiencia. En fases de diseño, permite aproximar resultados y acotarlos, además de testar cada prototipo con diferentes condiciones de corte, geometrías y materiales y no tener que utilizar varios prototipos con las mismas condiciones.

Para el empleo de simulaciones numéricas, es necesario personal cualificado que tenga conocimiento del *software* y consiga optimizar el modelo y analizar los resultados teóricos, pero se consigue ahorrar el coste de la maquinaria, personal que realice las pruebas y personal cualificado que analice los resultados de los ensayos experimentales. Aunque el empleo del modelo numérico no implica la inexistencia de pruebas experimentales ya que siempre se necesitara una comprobación real, sí que se ahorra debido a la reducción del número de ensayos.

Además el *software* empleado como ABAQUS/*Explicit* puede ser amortizado en numerosos proyectos como los propuestos en el apartado 7.2 *Trabajos futuros*.

Sin embargo, cabe destacar que los resultados obtenidos en este proyecto son aproximados aunque válidos ya que, para realizar las simulaciones en la herramienta de cálculo, se ha establecido una ley teórica de comportamiento del material. A su vez, no se tienen en cuenta los posibles problemas técnicos que al realizar las pruebas experimentales pueden surgir. Al diseñar el modelo numérico y establecer las condiciones de cada simulación, se han supuesto ciertas hipótesis que en la realidad no se cumplen de manera ideal. Además, en las simulaciones no se tienen en cuenta las vibraciones de la máquina, que la herramienta puede no estar totalmente afilada,... por lo que estas solo sirven para acotar los resultados y asegurarlos dentro de unos límites.

A partir del modelo numérico se pueden realizar trabajos futuros según las modificaciones que se realicen, lo que permite avanzar y progresar en este tema de investigación y en el desarrollo tecnológico. Además, se mejora el rendimiento, la productividad, la competencia en los procesos de mecanizado, así como la eficiencia en la utilización de los recursos.

Por último, el disminuir el número de ensayos, conlleva la reducción de la contaminación en procesos de fabricación y en el consumo de energía. Además, no solo el empleo de simulaciones numéricas para predecir el posible comportamiento del material permite reducir el costoso número de prototipos, material, maquinaria,... sino que, por otro lado, el material de estudio, el acero, puede ser reciclado. Esto conlleva la reducción en el consumo de materias primas cuya extracción es costosa económica y energéticamente y provoca un impacto ambiental importante.

6.2 Presupuesto

Para realizar el presupuesto del presente proyecto hay que tener en cuenta que el tiempo dedicado a su elaboración ha sido de 7 meses, cuyas actividades están descritas en la *tabla 1* y han sido representadas en el diagrama de Gantt de la *figura 2*.

El presupuesto se ha realizado de manera aproximada, estableciendo unos costes orientativos que permitan valorar el total del presente proyecto. Este coste total es de 23624€, y comprende los costes directos de personal y equipos, así como su amortización, y los costes indirectos que se ha estimado sean un 20 % de los directos. A continuación se realiza un desglose de los costes directos.

Para la elaboración de este proyecto se ha contado con la participación de un ingeniero senior y un ingeniero junior. La proporción de dedicación al proyecto es de 5 horas de ingeniero junior por cada hora de ingeniero senior, y el trabajo realizado se ha estimado que tiene un coste mensual de 4289.54 y 2694.39 €, respectivamente. Por lo tanto, el trabajo del personal supondrá un coste de 17761.49 €.

Como en este proyecto se realizan simulaciones numéricas, es imprescindible contar con un ordenador personal de cálculo y una licencia de Abaqus para su lanzamiento, así como una licencia de Microsoft Office para la elaboración de la memoria y realización de las gráficas para analizar los valores. Su coste para el ordenador y la licencia de Abaqus ha sido de 600 € (suponiendo incluida la licencia de Microsoft Office) y 3000€, respectivamente. Por otro lado,

el periodo de depreciación es de 24 meses para el ordenador y de 12 meses para las licencias. Además, se estima que durante los 7 meses el equipo tiene uso exclusivo para este proyecto (100%). Por último se calcula la amortización de cada equipo mediante la expresión proporcionada en la hoja de presupuesto. El coste total de los equipos es de 1925€.

Por lo tanto, el coste aproximado de la realización de este proyecto al que se han dedicado 7 meses es de 23625€, como se ha comentado con anterioridad. A continuación se facilita la hoja de presupuesto en la que se indica más detalladamente lo explicado en este apartado.

PRESUPUESTO DE PROYECTO

1.- Autor: Nuria Herrero Cuenca

2.- Departamento: Ingeniería Mecánica

3.- Descripción del Proyecto:

- Título: Simulación bidimensional del corte del acero AISI 1050
- Duración (meses): 7
- Tasa de costes Indirectos: 20%

4.- Presupuesto total del Proyecto (en Euros): 23,624

5.- Desglose presupuestario (costes directos)

PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes)	Coste hombre mes	Coste (Euro)	Firma de conformidad
Soldani, Xavier		Ingeniero Senior	1	4,289.54	4,289.54	
Herrero Cuenca, Nuria		Ingeniero	5	2,694.39	13,471.95	
Ingenieros / mes			6	Total	17,761.49	

EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable a)
Ordenador personal de cálculo	600.00	100	7	24	175.00
Licencia de Abaqus	3,000.00	100	7	12	1,750.00
Licencia de Microsoft Office	0.00	100	7	12	0.00
Total					1,925.00

a) Fórmula de cálculo de la Amortización:

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

A = n° de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado

B = periodo de depreciación (60 meses)

C = coste del equipo (sin IVA)

D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS

Descripción	Empresa	Coste imputable
Total		0.00

OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO

Descripción	Empresa	Costes imputable
Total		0.00

6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	17,761
Amortización	1,925
Subcontratación de tareas	0
Costes de funcionamiento	0
Costes Indirectos	3,937
Total	23,624

CAPÍTULO VII

7. Conclusiones y trabajos futuros

En este último capítulo se recogen todas las conclusiones que se han ido obteniendo al realizar el análisis de cada parámetro en profundidad. Por último, se plantean trabajos futuros que completan el estudio del comportamiento del acero AISI 1050 en el proceso de mecanizado en corte ortogonal.

7.1 Conclusiones

Este proyecto tenía como objetivos principales realizar un estudio sobre el comportamiento del acero AISI 1050 en un proceso de mecanizado, así como validar el modelo numérico empleado mediante la herramienta de cálculo ABAQUS/*Explicit*, comparando los datos experimentales de la bibliografía con los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas. Así mismo, se pretendía analizar la influencia que tienen algunos parámetros de corte como la velocidad de corte, el avance y el coeficiente de fricción, sobre otras variables como son las fuerzas de corte y de avance, la morfología de la viruta y la longitud de contacto.

A partir de la realización de este proyecto, se llega a las siguientes conclusiones:

1. El modelo numérico empleado para el acero AISI 1050 se ha estudiado y ha sido validado ya que los resultados obtenidos sobre las fuerzas de corte y de avance de las simulaciones presentan una tendencia similar y unos valores numéricos muy aproximados a los de los datos experimentales de la bibliografía.
2. En el estudio de la influencia de la velocidad de corte sobre las fuerzas de corte y de avance, se observa que para cada velocidad de corte, existe una gráfica *fuerza-tiempo* diferente, siendo la tendencia para todas las gráficas la misma. En las gráficas en las que se presentan las fuerzas de corte y de avance frente a la velocidad de corte, se observa que el valor de la fuerza disminuye a medida que aumenta la velocidad de corte. Inicialmente, las fuerzas disminuyen bruscamente y existe una tendencia a que esas fuerzas se estabilicen para velocidades mayores a las estudiadas. Cabe destacar que los valores numéricos de las fuerzas de corte son mayores que las fuerzas de avance.
3. En el estudio de la influencia de avance sobre las fuerzas de corte y de avance, se observa que, para una fricción constante, a medida que aumenta el avance, los valores de las fuerzas aumentan también. De la misma manera, las fuerzas de corte son mayores que las fuerzas de avance y presentan ambas la misma tendencia citada anteriormente.
4. En el estudio de la influencia del coeficiente de fricción sobre las fuerzas de corte y de avance, se observa que para un avance constante, los valores de las fuerzas son menores a medida que disminuye el valor del coeficiente de fricción. Al igual que con el resto de parámetros estudiados, los valores de las fuerzas de corte son mayores que los de las fuerzas de avance.

5. Atendiendo a la morfología de la viruta, se observa que esta es continua y a medida que aumenta la velocidad de corte, la viruta que se forma es más esbelta. Asimismo, un incremento de la fricción conlleva una menor esbeltez en la viruta formada. Por último, al disminuir el avance, se observa que la viruta presenta mayor esbeltez.
6. Atendiendo a la longitud de contacto, se observa que este parámetro sigue la misma tendencia que la fricción, aumentando a medida que aumenta esta. Asimismo, realizando un estudio de la influencia de la velocidad de corte en la longitud de contacto se observa que la longitud de contacto entre la viruta y la herramienta disminuye con el aumento de velocidad, existiendo una velocidad de corte crítica a partir de la cual la longitud de corte se estabiliza. Por último, al aumentar el avance, también lo hace la longitud de contacto.

Como conclusión final de este trabajo, cabe decir que el empleo de simulaciones numéricas mediante la herramienta de cálculo utilizada para conocer el comportamiento del acero AISI 1050, permite reducir el tiempo de realización de ensayos y abaratar los costes de los procesos de industrialización. El establecer modelos numéricos válidos que permitan aproximar teóricamente los resultados que se obtendrían de los ensayos, mejora la eficiencia y la productividad de las industrias que empleen estos procesos de mecanizado. Además, la difusión de este tipo de proyectos permite a la comunidad científica progresar y realizar avances en investigación ya que pueden servir de base a futuros estudios más pormenorizados de la influencia de otros parámetros en dichos procesos.

7.2 Trabajos futuros

A partir de este proyecto, se plantean varias ideas a futuro que permitan complementar este trabajo y otros que ya se hayan realizado previamente, además de que ayuden a progresar en la investigación del proceso de mecanizado por corte ortogonal de aceros debido a la importancia de este material.

- A) Al validar el modelo numérico empleado para simular el mecanizado por corte ortogonal del acero AISI 1050, este se puede aplicar para metales con otras propiedades.

- B) En este proyecto se estudia la influencia de la velocidad de corte, el avance y el coeficiente de fricción pero también se puede estudiar la influencia de otros parámetros, como pueden ser:
1. La profundidad de corte.
 2. El ángulo de incidencia.
 3. El ángulo de desprendimiento.
 4. El radio de punta de la herramienta.
 5. El tamaño de malla.
- C) Incluso dentro de los parámetros considerados en este proyecto, se puede estudiar el comportamiento del material con valores diferentes a los analizados.
- D) Se puede estudiar la influencia del coeficiente de fricción en la interfaz virtual-herramienta estableciendo diferentes valores constantes para cada simulación y analizando los resultados obtenidos.
- E) Se puede analizar cómo influye en los resultados las posibles modificaciones de los parámetros de Johnson-Cook.
- F) Se pueden emplear mallas con mayor número de elementos, es decir, más refinadas, obteniendo información más precisa de los resultados. Incluso se puede reducir el tamaño de los elementos en aquellas zonas donde se necesite obtener mayor información, optimizando a su vez el tiempo de cómputo.
- G) Se puede estudiar el comportamiento tridimensional del material en el proceso de mecanizado de corte oblicuo.
- H) Se pueden obtener otras variables para análisis como pueden ser:
1. El ángulo de cizallado.
 2. El ancho de banda de cizallamiento.
 3. La frecuencia de segmentación de la banda.

Si se dispone de otros datos experimentales con los que realizar una comparación para validar el modelo, estos mismos deberán ser los que se obtengan de las simulaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. UPM, "El acero, ¿un material pasado de moda? | Materiales al día - Novedades en Ingeniería de Materiales", *Madrimasd.org*, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/ingenieriamateriales/2012/07/02/534/>.
- [2] "Acero", *Es.wikipedia.org*, [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Acero#Aplicaciones>.
- [3] G. Vizán Viñas, *Estructuras del vehículo*. Pozuelo de Alarcón, Madrid: Editex, 2014.
- [4] «alitransformados.es,» [En línea]. Disponible en: <http://www.alitransformados.es/faq/maecenas-tristique-orci-ac-sem-duis-ultricihre-tramagnauae-ab-illo-inventoa-ster-port-rsen-maet-jhaslelu-misleui-portau-2/>.
- [5] A. Carnicero, "Introducción al método de los elementos finitos." *Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI. Universidad Pontificia Comillas, Madrid* (2001). [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/33526022/INTRODUCCION_AL_METODO_DE_LOS_ELEMENTOS_FINITOS_1.1_INTRODUCCION
- [6] J. Apraiz Barreiro, *Aceros especiales y otras aleaciones*. Madrid: Dossat, 1986.
- [7] "Clasificación del Acero por composición química, propiedades o uso | Allstudies.com", *Allstudies.com*. [En línea]. Disponible en: <http://allstudies.com/clasificacion-acero.html>
- [8] "MatWeb - The Online Materials Information Resource", *Matweb.com* [En línea]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=20c682ad35514c5cb4d7bb19834b66e5&ckck=1>
- [9] *Catálogo de aceros especiales "HEVA"*. Bilbao: S.A. Echevarría, 1946.
- [10] S. Kalpakjian, S. Schmid, G. Sanchez García, o. Figueroa López y F. Sandoval Palafox, *Manufactura, ingeniería y tecnología cSerope Kalpakjian, Steven R. Schimd; traducción*

Gabriel Sánchez García; revisión técnica Ulises Figueroa Lopez, Francisco Javier Sandoval Palafox, 4ª Edición. México: Pearson Educación, 2002.

- [11] "CLASIFICACIÓN AISI-SAE DE LOS ACEROS", *Academia.edu*. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/8537175/CLASIFICACION_AISI-SAE_DE_LOS_ACEROS.
- [12] "Clasificación de Aceros", *Scribd*. [En línea]. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/313191944/Clasificacion-de-Aceros>.
- [13] J. Masaitis, "Iron and steel industry", *Ilocis.org*. [En línea]. Disponible en: <http://www.ilocis.org/documents/chpt73e.htm>
- [14] [En línea]. Disponible en: <http://montajesurbanos.com/aceroalcarbon.html>.
- [15] [En línea]. Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/mival/product-32905-1890354.html>
- [16] [En línea]. Disponible en: <http://pemigsa.com.mx/acero-al-carbon>
- [17] M. Espinosa Escudero, *Introducción a los procesos de fabricación*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2003.
- [18] [En línea]. Disponible en: http://www.mecmarin.com/proceso_mecanizacion.html
- [19] Apuntes de Tecnología Mecánica (3º curso de Grado de Ingeniería Mecánica) Universidad Carlos III Madrid.
- [20] M. Miguélez, J. Cantero, J. Canteli and J. Filippone, *Problemas resueltos de tecnología de fabricación paso a paso*. Madrid: Paraninfo, 2014.
- [21] L. López de Lacalle Marcaide, J. Sánchez Galíndez and A. Lamikiz Menchaca, *Mecanizado de alto rendimiento: procesos de arranque*. Bilbao: Ed. Técnicas Izaro, 2004.

- [22] S. Kalpakjian, S. Schmid and Espinoza Limón Jaime, *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México, D.F.: Pearson Educacion, 2008.
- [23] E. Trent and P. Wright, *Metal cutting*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [24] [En línea]. Disponible en: http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/ingenieria-estructural/material-de-clase-1/apuntes/Capitulo_9.-Introduccion_al_metodo_de_los_elementos_finitos.pdf. [Acceso: 19/06/2017].
- [25] [Enlínea]. Disponible en:
https://www.iit.comillas.edu/carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf
- [26] M. H. Miguélez, X. Soldani, A. Molinari , “Analysis of adiabatic shear banding in orthogonal cutting of Ti alloy”. *International Journal of Mechanical Sciences*, 75, pp. 212-222, Octubre 2013. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10016/21580>
- [27] X. Soldani, “Modélisation analytique de l ‘usinage a grande vitesse et étude de l’usure en cratère–application au tournage”, Tesis doctoral, Université Paul Verlaine-Metz, Francia, 2008. [En línea]. Disponible en: http://fondation.cetim.fr/pages/projets/THESE-soldani18_02_2009.pdf